



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Bioadsorción de nitratos presentes en salmueras procedentes de plantas de ósmosis inversa

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**Autor:** Pablo Hernández Giner  
**Director:** José Antonio Fernández López  
**Codirector:** Ricardo Martínez Vives



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Cartagena, 23 de junio de 2021

## AGRADECIMIENTOS

*Quería agradecer en primer lugar a mi director de prácticas de empresa Ricardo Martínez Vives, "Ricky", por la oportunidad que me ofreció de poder trabajar con él, por instruirme, orientarme y ayudarme en este proceso de aprendizaje durante mi primera experiencia laboral. Gracias por la paciencia que has tenido conmigo y tu dedicación.*

*A mi tutor del TFG, José Antonio Fernández López, que sin su ayuda y conocimientos no hubiera sido posible la correcta realización de este trabajo.*

*A mi familia, que me han apoyado en todo momento, acompañándome en cada una de las diferentes etapas de estos años de aprendizaje. En especial gracias a mis padres, pues desde muy pequeño me han enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue.*

*A mi novia, por apoyarme en todas mis decisiones y en todos mis proyectos, dándome el apoyo y la confianza que tanto necesitaba en todo momento.*

*A mis compañeros de la carrera, en especial a Miguel, por toda la ayuda que me ha ofrecido, sus buenos consejos y por su espíritu de trabajo y esfuerzo que tanto me ha motivado para llegar hasta aquí.*

*A toda mi familia y amigos, por su apoyo y cariño durante todos estos años.*

*Y por último, gracias a Dios, por permitirme terminar esta etapa de mi vida de la mejor manera posible y por darme la luz que necesito para emprender nuevos caminos en mi futuro.*

## ÍNDICE

1. SUMARIO .....	6
2. INTRODUCCIÓN .....	8
2.1. Contaminación hídrica. Causas y principales contaminantes del agua.....	8
2.1.1. Contaminación natural de las aguas.....	8
2.1.2. Contaminación antropogénica de las aguas.....	10
2.2. Contaminación hídrica por nitratos a nivel internacional y nacional.....	13
2.3. Contaminación hídrica por nitratos en la Región de Murcia .....	14
2.4. Métodos de purificación de aguas. Eliminación de nitratos .....	17
2.4.1. Tratamiento biológico .....	17
2.4.1.1. Lodos activos.....	18
2.4.1.2. Biodiscos .....	18
2.4.1.3. Tratamiento Bioelectroquímico .....	19
2.4.1.4. Biorreactores de membrana (MBR) .....	19
2.4.1.5. Asimilación .....	20
2.4.1.6. Remoción anaeróbica .....	21
2.4.1.7. Ventajas y desventajas de los procesos biológicos .....	21
2.4.2. Electrorreducción.....	21
2.4.3. Adsorción.....	22
2.4.4. Electrodialisis.....	22
2.4.5. Ósmosis Inversa.....	23
2.4.6. Intercambio iónico .....	23
2.4.7. Catálisis heterogénea .....	24
3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	25
4. ANTECEDENTES.....	29
4.1. Métodos de eliminación de nitratos mediante tratamientos biológicos .....	29
4.1.1. Lodos activos .....	29

4.1.2. Biodiscos.....	32
4.1.3. Tratamiento Bioelectroquímico .....	34
4.1.4. Biorreactores de membrana (MBR) .....	37
4.1.5. Tratamiento anaerobio .....	43
4.2. Electrorreducción .....	45
4.2.1. Tratamiento por electrooxidación .....	45
4.2.2. Tratamiento por electrocoagulación (EC) .....	46
4.3. Electrodialisis.....	47
4.4. Ósmosis inversa.....	49
4.5. Intercambio iónico.....	52
4.6. Catálisis heterogénea .....	55
4.7. Adsorción.....	57
5. PARTE EXPERIMENTAL.....	63
5.1. Materiales.....	63
5.2. Métodos .....	64
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	70
6.1. Representación e interpretación de los resultados .....	70
6.1.1. Porcentaje nitratos adsorbidos por muestra teniendo en cuenta el tiempo ....	70
6.1.2. Porcentaje nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº2 (recién lavado)..	76
6.1.3. Porcentaje nitratos adsorbidos tras los “mini-lavados” .....	78
6.2. Problemas y observaciones del desarrollo experimental .....	80
6.2.1. Problemática con el medidor de nitratos.....	80
6.2.2. Problemática con el medio adsorbente .....	81
6.2.3. Problemática con el uso de HCl.....	83
6.3. Diseño de un sistema en continuo para el tratamiento por bioadsorción de aguas con exceso de nitratos .....	85
7. CONCLUSIONES.....	90
8. BIBLIOGRAFÍA .....	91
9. ANEXO.....	98

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Cuenca de drenaje hacia el Mar Menor en el Campo de Cartagena .....	14
<b>Figura 2.2</b> Mapa de la situación de los acuíferos. <i>Fuente: CHS</i> .....	15
<b>Figura 2.3</b> Proceso de eutrofización del Mar Menor .....	16
<b>Figura 2.4</b> Biorreactor de membrana (MBR) .....	20
<b>Figura 2.5</b> Materiales nanométricos para la remoción de nitratos en adsorción y catálisis .....	24
<b>Figura 4.1</b> Proceso de lodos activos de flujo continuo o convencional .....	30
<b>Figura 4.2</b> Reactor discontinuo secuencial (RBS) .....	31
<b>Figura 4.3</b> Sistema de Biodiscos .....	33
<b>Figura 4.4</b> Planta de tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos .....	33
<b>Figura 4.5</b> Esquema de un sistema bioelectroquímico .....	35
<b>Figura 4.6</b> Prototipo de electrometanogénesis desarrollado por Leitat .....	37
<b>Figura 4.7</b> Gráfico de la distribución mundial del tratamiento MBR. <i>F: Elaboración Bluegold</i> ..38	
<b>Figura 4.8</b> Esquema de sistema MBR en comparativa con un sistema convencional de lodos activados .....	39
<b>Figura 4.9</b> Etapas del sistema MBR. <i>Fuente: Elaboración Bluegold</i> .....	39
<b>Figura 4.10</b> Esquema de biorreactor de membrana de configuración interna .....	40
<b>Figura 4.11</b> Esquema de biorreactor de membrana de configuración externa .....	40
<b>Figura 4.12</b> Balance anaerobio de la materia orgánica. <i>Fuente: www.uasb.org</i> .....	44
<b>Figura 4.13</b> Muestra de agua procedente de una industria textil, antes y después de su tratamiento por electrocoagulación y filtración .....	47
<b>Figura 4.14</b> Esquema del proceso de electrodiálisis. <i>Fuente: Universidad de Alicante</i> .....	48
<b>Figura 4.15</b> Proceso de ósmosis inversa y componentes de una membrana según el modelo de John Critterden .....	50
<b>Figura 4.16</b> Planta de ósmosis inversa .....	50
<b>Figura 4.17</b> Proceso de intercambio iónico .....	53
<b>Figura 4.18</b> Proceso de obtención de carbón activado a partir de desecho doméstico .....	58
<b>Figura 4.19</b> Esquema del proceso de eliminación de nitratos mediante quimioadsorción .....	59

<b>Figura 4.20</b> Carbón activado granular .....	61
<b>Figura 4.21</b> Carbón activado en polvo .....	62
<b>Figura 5.1</b> Material de laboratorio empleado .....	63
<b>Figura 5.2</b> Peso electrónico empleado para medir los gramos de $\text{NaNO}_3$ .....	65
<b>Figura 5.3</b> Disolución madre depositada en una botella enumerada .....	65
<b>Figura 5.4</b> Medidor de nitratos (HORIBA LAQUAtwin $\text{NO}_3^-$ 11) .....	65
<b>Figura 5.5</b> Proceso de medición de nitratos .....	65
<b>Figura 5.6</b> Medio adsorbente unido al kitasato conectado a la bomba de vacío .....	67
<b>Figura 5.7</b> Proceso de lavado con HCl con las correspondientes medidas de seguridad .....	68
<b>Figura 5.8</b> Esquema del proceso de adsorción de nitratos .....	69
<b>Figura 6.1</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 100 – 119 ppm .....	71
<b>Figura 6.1</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 100 – 119 ppm .....	72
<b>Figura 6.2</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 120 – 139 ppm .....	73
<b>Figura 6.3</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 140 – 150 ppm .....	73
<b>Figura 6.4</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 25 – 80 ppm .....	74
<b>Figura 6.5</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 81 – 99 ppm .....	75
<b>Figura 6.6</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ de las muestras recién lavadas y el % retenido por el medio adsorbente .....	77
<b>Figura 6.7</b> Relación entre la concentración inicial de $\text{NO}_3^-$ de las muestras tras un “mini-lavado” y el % retenido por el medio adsorbente .....	79
<b>Figura 6.8</b> Manipulación del HCl siguiendo las correspondientes medidas de seguridad .....	84
<b>Figura 6.9</b> Porción dañada del conducto .....	84
<b>Figura 6.10</b> Pieza dañada de la bomba de vacío debido a la corrosión por HCl.....	84
<b>Figura 6.11</b> Planta de tratamiento de aguas de Tomás Ferro ( $100 \text{ m}^3/\text{día}$ ) .....	85
<b>Figura 6.12</b> Planta automatizada de adsorción de nitratos .....	89

---

**ÍNDICE TABLAS**

<b>Tabla 4.1</b> Comparativa de ambas configuraciones MBR .....	42
<b>Tabla 5.1</b> Caracterización del medio adsorbente .....	64
<b>Tabla 9.1</b> Resultados obtenidos en el laboratorio .....	98

## 1. SUMARIO

### Resumen:

La problemática de la contaminación hídrica es uno de los frentes abiertos con mayor dedicación investigadora. No en vano, solo el 2,53% del agua es dulce y menos del 1% está disponible para el consumo humano.

El acceso al agua dulce del planeta siempre ha sido una fuente de estabilidad, de poder y de conflicto. A nivel global, el agua dulce no es escasa, sin embargo, hay una gran diferencia de disponibilidad de los recursos hídricos en los diferentes continentes. Por tanto, considero que el desarrollo del recurso hídrico de agua dulce sería sostenible si existiese la posibilidad de satisfacer las necesidades en tanto a cantidad y a calidad de agua dulce, tanto a nuestras generaciones humanas como a los ecosistemas del planeta, sin limitar de ningún modo las propias necesidades de nuestras futuras generaciones.

En muchas regiones del planeta, la escasez de agua es un problema crítico, y uno de los principales factores causantes de esta problemática global es el aumento exponencial de la población mundial, durante el siglo XX, la población mundial se ha triplicado y se ha multiplicado por seis el uso del agua [1].

Otro factor muy importante a tener en cuenta, es el uso del agua dulce para la agricultura, principal fuente de suministros de alimentos en el mundo. El ser humano, siempre ha utilizado la mayor parte del agua dulce disponible para el riego, no es de extrañar que pese a que, a lo largo del siglo XX, el uso del agua para el sector industrial y el doméstico haya ido en aumento, el sector agrícola aún se lleve la mayor parte. En la mayoría de los países desarrollados, alrededor del 70% de extracciones de agua dulce se usan para la agricultura. Según el PNUD (2006), los volúmenes de agua necesarios para elaborar una cosecha son desmesurados, son necesarios 3000 litros de agua para cultivar un kilogramo de arroz o 1000 litros de agua por cada kilogramo de grano [2]. Por tanto, en lo referido a la importación y exportación de alimentos, se requieren grandes volúmenes de agua.

A día de hoy, la sobreexplotación del agua subterránea llevada a cabo por los agricultores rebasa la tasa de renovación de los acuíferos. Sumado al aumento de la salinización de los suelos y la reducción de los caudales de los ríos, provoca que muchos agricultores tengan que desplazarse largas distancias para conseguir más agua. Si a esto le acompaña la escasez de



lluvias, nos encontramos ante una de las consecuencias más desestabilizadoras a nivel mundial, pues pese a que solo el 18% de las tierras dedicadas al cultivo son de regadío, este 18% nos proporcionan alrededor del 40% de los alimentos del mundo [3]. He aquí una razón muy importante de encontrar soluciones para detener el aumento de contaminación hídrica, debido, por ejemplo, al uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y no nitrogenados en los campos de cultivo. Este uso excesivo de los fertilizantes y plaguicidas en los campos de cultivo no solo va provocar problemas medioambientales como pueden ser la eutrofización de parajes naturales como el Mar Menor, sino que además conllevará la contaminación de ríos o aguas subterráneas, como los acuíferos, cuyas aguas son imprescindibles tanto en el sector agrícola para el riego de los campos de cultivo, como para el consumo humano. Derivando, por tanto, en una falta de alimentos, restricciones y en muchas regiones del planeta, conflictos.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Contaminación hídrica. Causas y principales contaminantes del agua.

La contaminación del agua se puede definir como “cualquier alteración de sus características organolépticas, físicas, químicas, radiactivas y microbiológicas, como resultado de las actividades humanas o procesos naturales, que producen o pueden producir rechazo, enfermedad o muerte al consumidor”. Este concepto de contaminación del agua se plantea como toda alteración física, química y biológica que provoca efectos dañinos sobre el ambiente y los seres vivos. Como acabamos de definir, dicha contaminación puede ser debido a procesos naturales o como resultado de actividades antropogénicas.

#### 2.1.1. Contaminación natural de las aguas.

En primer lugar, destacaremos los contaminantes naturales del agua, en la naturaleza existen elementos que contaminan el agua sin intervención humana, sin embargo, es cierto que escasas veces llega a alcanzar niveles alarmantes.

En primer lugar, uno de los principales contaminantes de origen natural de gran parte de las aguas de nuestro planeta, son los nitratos. Según la Directiva 91/676/CEE del consejo, en relación a la problemática situación hídrica por la presencia de nitratos empleados en la agricultura, se considera agua contaminada cuando los niveles de concentración de nitratos superan los 50 mg/L [4].

Debido a que los nitratos se encuentran disueltos en el agua de forma natural, y que además no poseen ni color, ni sabor, se hace difícil su apreciación. Estos nitratos se emplean en las actividades de cultivo, siendo los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), el fósforo ( $P$ ) y el potasio ( $K$ ), macronutrientes primarios necesarios para el crecimiento natural de la planta. El problema sucede cuando los compuestos nitrogenados de origen agrícola son introducidos en los medios acuáticos, llegando a provocar grandes riesgos en la salud humana, deteriorar los recursos vivos y la biosfera marina. Por ello, es de real importancia tener un control de la concentración de nitratos existentes, tanto en nuestras aguas de consumo como en las aguas superficiales o subterráneas utilizadas para el sector agrícola, evitando así graves efectos perjudiciales para nuestra salud, para el medio ambiente y para todos los seres vivos que puedan verse afectados en el ecosistema [4].

Por otro lado, el flúor y el arsénico son otra fuente de contaminación natural a tener en cuenta. Según la OMS, más de 400 millones de personas sufren actualmente por la contaminación en las aguas por flúor, y no solo eso, sino que aproximadamente 140 millones de personas padecen los inconvenientes de la existencia de arsénico en más de 70 naciones. La contaminación natural del agua suele localizarse en su mayoría en los acuíferos, cuando el agua fluye subterráneamente, disolviendo elementos existentes en las diferentes capas superficiales de los suelos. Entre los más característicos se encuentran los fluoruros, y el arsénico:

- **Flúor**

Este elemento químico está presente en todas las aguas en concentraciones mayores o menores, generalmente, no sobrepasan los 0,3 mg/L. El flúor es un micromineral muy importante para nuestro organismo, gracias a sus positivas propiedades para el mantenimiento del esmalte dental y para la formación de los huesos, siendo una gran ayuda tanto para la prevención de enfermedades de índole dental, como para ser usado como tratamiento en numerosos casos de osteoporosis.

Sin embargo, ingerido en demasía puede ser muy nocivo para la salud. Según la OMS, el consumo humano de flúor no debe ser superior a 1,5 mg/L. Ingerir una concentración mayor en exceso puede provocar fluorosis, la cual es una enfermedad muy grave y perjudicial para los niños menores de 8 años, pues puede generarles efectos opuestos a las ventajas que ofrece el flúor en dosis más pequeñas. Llegándole a provocar graves lesiones como dentales y óseas, puede alterar el desarrollo de nuestro sistema nervioso e incluso, enfermedades que afectan a la pigmentación de la piel. En muchas ocasiones, los enfermos no se cercioran de estos problemas físicos hasta una exposición larga y prolongada con este micromineral, incrementando la dolencia en la salud de los afectados.

Dicha enfermedad se halla en más de 22 países, cabe destacar el caso de México, donde en ciertas regiones como en el estado de Guanajuato, el 40% de los habitantes padecen fluorosis severa generada en su mayoría por la ingesta de agua contaminada de los más de 23.000 extracciones de dicha región, más de 5.000 no son legales y no son controlados. La propagación de esta enfermedad en estas regiones se debe a la explotación masiva de dichas aguas subterráneas, llegando a excavar a profundidades superiores de los 200 metros, dónde el agua ha estado en contacto con la tierra durante miles de años, conteniendo, por tanto, altas concentraciones de flúor y arsénico [5].

- **Arsénico**

Es una de las 10 sustancias químicas más preocupantes para la salud pública, según la OMS. La contaminación de las aguas por arsénico se debe a la sobreexplotación de los acuíferos. El arsénico está presente de forma natural en las aguas subterráneas de numerosos países, afectando a más de 140 millones de personas, de los que destaco algunos grandes como Bangladesh, China, India, Chile, Argentina, México y EEUU.

El límite máximo establecido por la OMS son 10 µg/L. En algunas zonas del mundo, como en la región de Guanajuato, anteriormente mencionada, se han llegado a medir niveles de arsénico en el agua, cinco veces superior al umbral máximo fijado, así como, altos niveles de concentración de plomo y fluoruro. Existe la posibilidad de que el arsénico del agua pase a los alimentos que nosotros consumimos a través de las aguas de regadío. La exposición prolongada al arsénico a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede provocar cáncer y lesiones cutáneas, así como enfermedades cardiovasculares y diabetes [5].

### 2.1.2. Contaminación antropogénica de las aguas.

La contaminación antropogénica de las aguas, es toda aquella actividad o acción generada por el ser humano que provoca un efecto contaminante y, por ende, dañino, en los diferentes ecosistemas acuáticos, ya sean en aguas dulces o saladas. A continuación, enumeraré una serie de actividades antropogénicas causantes de este tipo de contaminación [6]:

- **Escorrentía de agricultura:** consiste en el transporte de fertilizantes, insecticidas, pesticidas, herbicidas, entre otros contaminantes en medios fluviales como lagos, ríos o estanques, aumentando la concentración de nitratos y fosfatos en el agua. Esto provocará un proceso de eutrofización en estas aguas, con un crecimiento descontrolado de algas, enturbiando el agua y dándole un color verdoso, reduciendo los niveles de oxígeno en ellas, y provocando la muerte de numerosas especies acuáticas, y además supondrá un riesgo para la salud humana.
- **Escurrimiento de aguas pluviales:** consiste en el transporte de diversos aceites, productos derivados del petróleo y otros contaminantes de áreas urbanas y rurales. Los efectos contaminantes por escurrimiento de aguas pluviales se pueden observar principalmente debido a las formas brillantes que se generan en la superficie del agua.

- **Líneas de alcantarillado con fugas:** estas fugas tan perjudiciales para los medios fluviales, pueden agregar trihalometanos (cloroformo) y otros contaminantes a las aguas subterráneas, contaminando posiblemente, a posteriori, a las aguas superficiales. Una de las fuentes de contaminación reconocidas más perjudiciales y persistentes, son las descargas de solventes clorados de tintorerías a líneas de alcantarillado.
- **Actividades mineras:** consisten en triturar rocas que generalmente contienen muchos sulfuros y oligoelementos, generando grandes volúmenes de residuos y de metales pesados, que son verdaderamente nocivos y persistentes en el medio ambiente, que pueden ser arrastrados hacia corrientes de agua o el propio mar, especialmente en áreas donde las lluvias presentan un carácter torrencial, un ejemplo muy próximo de este tipo de contaminación antropogénica es la contaminación de la laguna del Mar Menor por metales pesados, debido a la gran actividad minera a la que ha sido sometida la Sierra de Cartagena-La Unión, durante milenios, para la extracción de plomo, plata y zinc. Por otro lado, la actividad minera también genera el drenaje excesivo de ácidos al mar, por la oxidación de los minerales con sulfuros como son las piritas [7].
- **Fundiciones y descargas industriales:** durante el desarrollo de estas actividades industriales, el agua suele ser utilizado como sistema de refrigeración de los diferentes tipos de hornos. He aquí que surgirán corrientes de aguas residuales que deberán ser tratadas para desechar los compuestos orgánicos como fenol o aceite, antes de su descarga. Estas aguas residuales pueden tener altas cantidades de aceite y de sólidos en suspensión tras finalizar este tipo de actividades.
- **Fugas y derrames accidentales:** suele estar asociado con la manipulación y el almacenamiento de productos químicos. Estos accidentes pueden ocurrir en cualquier momento y, pese a que se suelen contener poco después de que ocurran, las aguas subterráneas y superficiales pueden llegar a sufrir graves efectos negativos debido a la presencia de estos productos químicos, que tanto contaminan las aguas y que pueden alterar la correcta preservación de la biodiversidad marina. Un ejemplo de este tipo de accidentes son los desastres que se producen debido al derrame de petróleo al mar debido al encallamiento de embarcaciones petrolíferas, como el desastre del Exxon Valdez en 1989, vertiendo 37.000 toneladas de hidrocarburo en la costa de Alaska.
- **Descargas deliberadas / ilegales de desechos:** es cierto que este tipo de sucesos son cada vez menos comunes en la actualidad, aún se pueden observar algunos casos debido

al alto costo de la eliminación adecuada de los desechos. Ilegalidades de este tipo se han dado recientemente en la Región de Murcia, gracias a la denominada “operación CHANDOS”, llevada a cabo por el Servicio de Protección de la Naturaleza (SEPRONA), agentes de la Guardia Civil, en abril de 2019, localizaron y precintaron 38 plantas desalobradoras y 35 pozos irregulares, pues estaban causando graves afecciones medioambientales en el Mar Menor, debido a la sobreexplotación mediante el uso de pozos de extracción de aguas ilegales.

- **Quema de combustibles fósiles y la emisión de contaminantes a la atmósfera:** las partículas de cenizas emitidas contienen metales tóxicos como el arsénico o el plomo. Al igual que las emisiones de los vehículos contaminan el aire con diversos compuestos de azufre y nitrógeno, así como óxidos de carbono, los cuales, podrán generar posteriormente lluvia ácida, producida por el contacto del agua evaporada con los gases contaminantes de la atmósfera. Esta precipitación de lluvia ácida y de deposición seca de partículas, contaminará gravemente las aguas superficiales.
- **Actividades de construcción:** las obras de construcción pueden liberar una serie de contaminantes en el suelo que eventualmente terminarán en las aguas subterráneas.
- **Los materiales plásticos o desechos en contacto con el agua:** los cuerpos conformados por este tipo de materiales se degradan lentamente liberando compuestos dañinos tanto para la salud humana como para el ecosistema.
- **Eliminación de productos para el cuidado personal y productos químicos domésticos:** este es uno de los problemas más graves de la contaminación del agua por origen antropogénico, pues son emisiones impredecibles y muy difíciles de controlar. Depende de nosotros minimizar estos efluentes de contaminación al agua, controlando nuestro consumo y eliminación de dichos productos químicos, así como intentar reciclar en la mayoría de lo posible.
- **Vertederos con fugas:** pueden provocar la contaminación de grandes masas de aguas subterráneas, depositando en los acuíferos una gran variedad de contaminantes. Un caso de este tipo, se dio en Menorca, debido a las fugas del vertedero de Milà en 2014, que provocó las filtraciones de lixiviados procedentes de esta celda de vertidos a las aguas subterráneas.

- **Sustancias radiactivas:** Isotopos radiactivos solubles que se acumulan a lo largo de las cadenas tróficas.
- **Contaminación térmica:** el agua a altas temperaturas liberada por centrales de energía o actividades industriales puede incrementar, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses, disminuyendo su capacidad de contener oxígeno y afectando, por tanto, a la vida de los organismos.

### 2.2. Contaminación hídrica por nitratos a nivel internacional y nacional

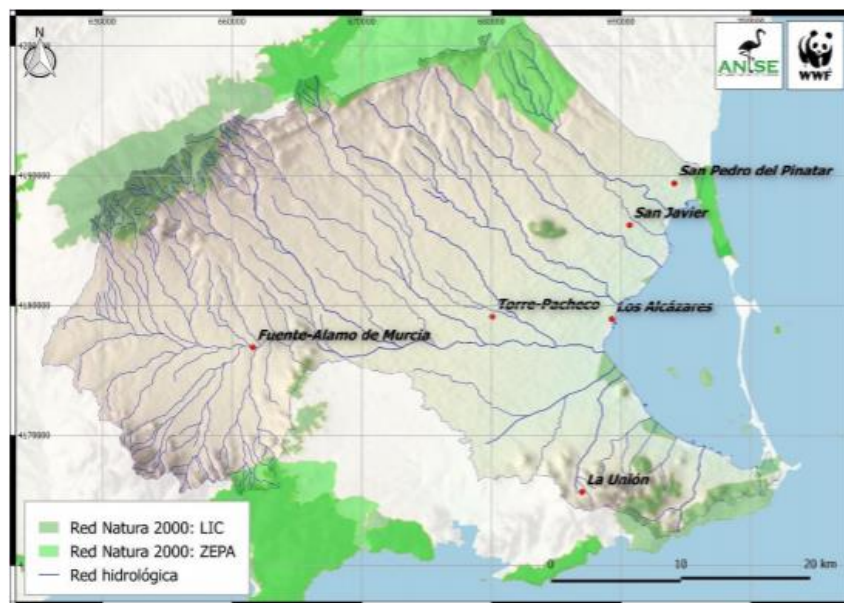
Los nitratos son uno de los principales contaminantes del agua debido a la agricultura y ganadería intensiva, así como a la sobreexplotación de masas de agua (acuíferos). En el mundo, yendo a una de las regiones con uno de los mayores déficits hídricos del planeta, en la llanura de Akkar en el norte del Líbano, la cual cubre una superficie de 130 km<sup>2</sup>, siendo así la segunda región agrícola más grande del país. La población de esta zona del país no dispone de una red pública de agua potable, por lo que han dependido durante muchos años de la utilización de las aguas de los acuíferos, sin contar con ningún medio de tratamiento, filtración o monitoreo. Debido a problemas agrícolas como la fertilización excesiva y la falta de vegetación durante las épocas invernales, ha provocado que todos los años se transporten toneladas de nitrógeno a las aguas subterráneas por infiltración o escorrentía. Si no se toman medidas urgentemente, se podrían generar daños irreversibles por la contaminación de estos acuíferos, afectando a miles de personas que dependen del sector agrícola. Los nitratos suponen uno de los principales problemas ambientales derivados de la actividad agrícola, y su preocupación con respecto a la salud surge debido a su posible conversión en nitrito, altamente tóxico. Según las pautas internacionales de la calidad del agua, permiten como máximo para adultos 50 mg de nitratos / L y para mujeres embarazadas y bebés, un máximo de 25 mg de nitratos / L [8]. El problema es tal, que, según análisis realizados en esta región, se encontraron valores de concentración de nitratos en aguas manantiales de hasta 192 mg / L, y se determinó que alrededor del 77% de las muestras tomadas en los manantiales de esta región tuvieron concentraciones de nitratos preocupantes (superando valores de 20 mg / L), siendo las fuentes antropogénicas las principales causantes de esta contaminación de los acuíferos [9].

No obstante, también dentro del panorama nacional, hay ciertas regiones como la Comunidad Valenciana que son ejemplo clave de los efectos perjudiciales debido a la presencia de altos niveles de nitratos en el agua potable, poniendo en riesgo la salud de miles de personas,

puesto que el consumo de aguas con alta concentración en nitratos puede ser muy dañino en bebés, dado el riesgo de metahemoglobinemia, que consiste en la aparición de metahemoglobina en la sangre impidiendo el correcto transporte del oxígeno. Se analizó la concentración de nitratos del agua potable de 467 municipios de la Comunidad Valenciana, que representan el 99% de la población de la comunidad autónoma, y se determinó que en 95 localidades superaban los niveles máximos permitidos según la legislación española, de los cuales, 32 municipios superaron el doble del valor máximo tolerable, y en otros 18 municipios llegaron a valores que sobrepasaban los 150 mg /L [10].

### 2.3. Contaminación hídrica por nitratos en la Región de Murcia

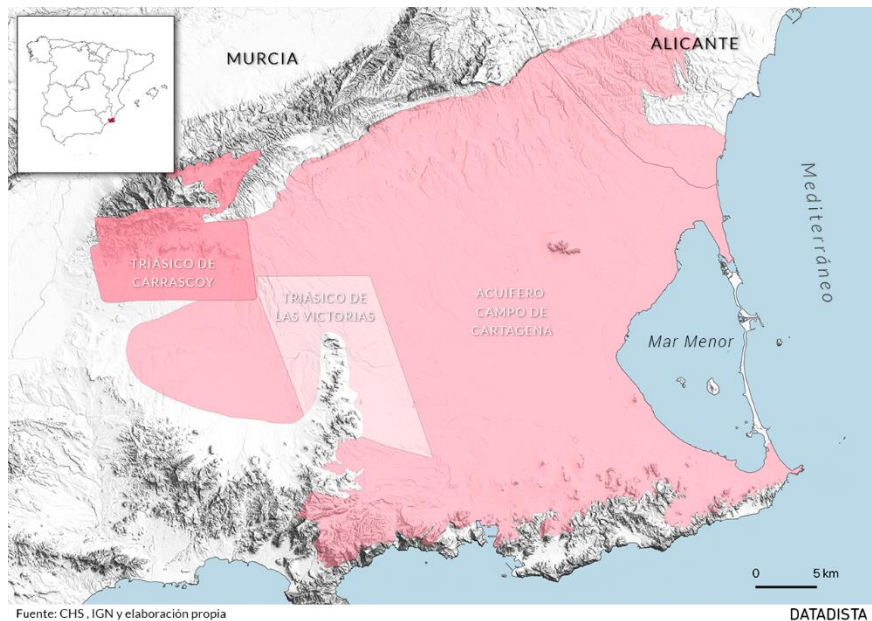
Más cerca aún de nosotros, en el Campo de Cartagena, se han producido en los últimos años graves problemas medioambientales que han afectado negativamente la preservación del Mar Menor. El Campo de Cartagena, es una unidad hidrogeológica extensa y compleja, por la cual, no existen cursos permanentes de aguas superficiales. Las Ramblas recogen las aguas que son desplazadas durante los escasos pero intensos períodos de lluvias a la laguna salada del Mar Menor. Por un lado, las ramblas de la Sierra Minera de La Unión liberan a la laguna estériles mineros, y por otro parte las ramblas que proceden del Campo de Cartagena, descargando los excedentes de riego, fertilizantes y pesticidas, provocando la llegada al Mar Menor de compuestos nitrogenados. Siendo estos últimos elementos una de las causas principales del proceso de eutrofización del Mar Menor.



**Figura 2.1.** Cuenca de drenaje hacia el Mar Menor en el Campo de Cartagena.

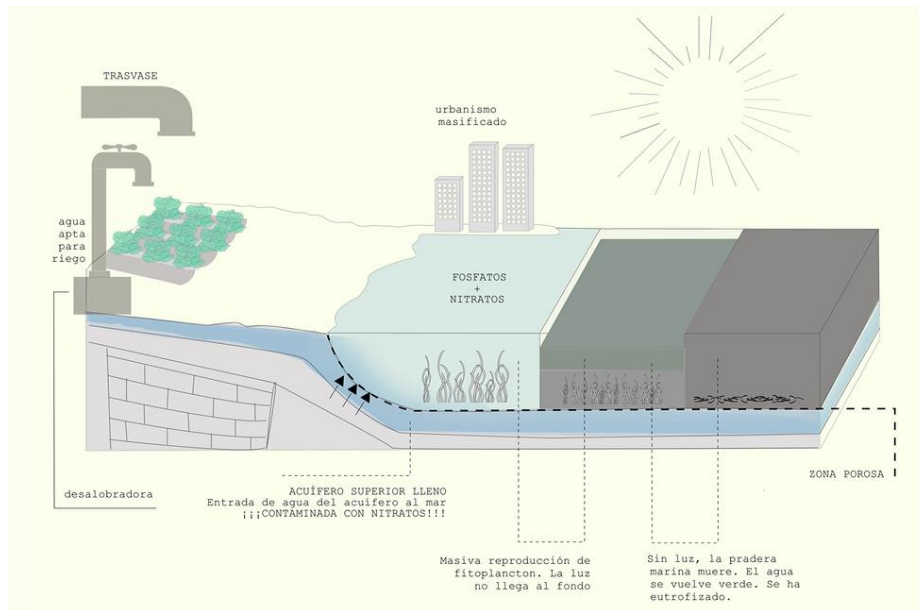


El Campo de Cartagena tiene relación con tres masas de agua subterránea: el Triásico de las Victorias, el Triásico de Carrascoy y el más grande de los tres, el acuífero del Campo de Cartagena.



**Figura 2.2.** Mapa de la situación de los acuíferos. *Fuente: CHS.*

El acuífero del Campo de Cartagena se caracteriza por ser un acuífero multicapa, donde las capas inferiores sufren de sobreexplotación, al contrario de lo que ocurre en la capa superior, la cual está conectada con el Mar Menor, y no posee un problema de cantidad de agua, sino justo lo contrario. Esto ha provocado un grave problema debido a la intrusión del agua de mar y la filtración del agua de riego de retorno al mar, incrementados con el agua de trasvase y la constante extensión del regadío, ha generado que el nivel freático suba a tal nivel que el agua llega a aflorar por la superficie de algunos puntos del lecho marino del Mar Menor.



**Figura 2.3.** Proceso de eutrofización del Mar Menor.

El principal problema de esta capa superior del acuífero es que está contaminada por los nitratos procedentes de los abonos del regadío, éste es uno de los principales enemigos de las masas de agua como el Mar Menor, pues abona el fitoplancton hasta que se reproducen de forma masiva y descontrolada, impidiendo el paso de la luz solar al fondo marino. Debido a esto, las aguas se vuelven verdes, como ocurrió durante varios meses en el año 2016, y, como consecuencia, la pradera marina, incapaz de hacer la fotosíntesis, muere, y no solo eso, sino que, además, este proceso de eutrofización afecta a la calidad de las aguas, disminuyendo los niveles de oxígeno disuelto en el mar, provocando episodios de anoxia que conllevan la muerte de un número masivo de especies marinas autóctonas del Mar Menor.

Se estima que, según estudios realizados en el acuífero del Campo de Cartagena, el nitrato acumulado durante décadas debe sobrepasar las 300.000 toneladas, con un valor medio de 244 mg/L, muy lejos de los 50 mg/L que dicta la directiva con respecto a los nitratos. Además, cabe destacar, que las aguas de este acuífero son salobres (provienen de la filtración del agua del Mar Menor), por lo que requieren ser mezcladas con otras aguas de baja salinidad o procesadas en desaladoras para que puedan ser utilizables para el riego. El proceso de desalación produce un 70% de agua apta para el riego y un 30% de vertido que concentra las sales y con ellas los nitratos. Ambos hechos unidos, la contaminación por nitratos y la salinidad, han generado un grave problema medioambiental que ya en los últimos años ha explotado cual bomba de relojería [11].

Es por esto por lo que urge la investigación para encontrar nuevos procesos para poder regenerar estas aguas contaminadas que permitan el uso corriente y seguro de estas, logrando la convivencia entre economía (agricultura y ganadería) y preservación del Medio Ambiente.

La finalidad de este proceso de investigación será tratar de lograr un medio filtrante económico, duradero en el tiempo y efectivo para lograr la eliminación de los  $\text{NO}_3^-$  sin interferencia con otros compuestos aniónicos presentes en las aguas y salmueras procedentes del acuífero.

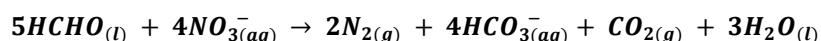
#### 2.4. Métodos de purificación de aguas. Eliminación de nitratos

Observando la cantidad de efectos perjudiciales que produce la presencia de una alta concentración de nitratos en aguas superficiales o subterráneas, provocando grandes problemas tanto en el medioambiente y la biodiversidad que rodea los diferentes ecosistemas acuáticos, como en nuestra propia salud, provocándonos enfermedades o incluso, en los peores casos, la muerte.

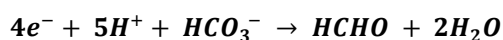
Es debido a esto que muchas empresas y equipos de investigación están trabajando para buscar diferentes tecnologías con el fin de conseguir eliminar los nitratos presentes en el agua. A continuación, detallaré una serie de tecnologías usadas con este fin, cada una de ellas presenta ciertas ventajas e inconvenientes. La posibilidad de utilizar una u otra variará en función de un gran número de aspectos como el coste, la calidad y uso que tendrá el agua a obtener, también dependerá de la calidad inicial que tenga el agua a tratar, de los efluentes producidos en el proceso de purificación y si requiere o no de post-tratamiento [12].

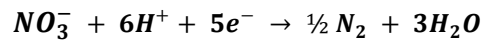
##### 2.4.1. Tratamiento biológico

Para el tratamiento biológico es necesario comprender al completo los procesos de transferencia de energía implicados, y así como los procesos estequiométricos usados para describirlos. Para la eliminación de nitrato, la reacción entre el carbono orgánico y el nitrato ocurre de la siguiente manera:



En esta reacción veinte electrones se transfieren desde el compuesto de carbono para reducir  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{N}_2$ . En cuanto a la reacción entre el nitrato y el carbono orgánico, con el fin de eliminar el nitrato, será la siguiente:





A continuación, debemos reducir el nitrato a gas nitrógeno, para ello tiene que ser proporcionado un donador de electrones abiótica o biológicamente. Durante este proceso de reducción de nitratos, se producen generalmente dos especies de nitrógeno muy importantes, los nitritos y el amoníaco. Dentro de los tratamientos biológicos, cabe destacar varios procesos bastante empleados en la eliminación de nitratos.

#### **2.4.1.1. Lodos activos**

El proceso de lodos activos es utilizado para la remoción de nitrógeno a través del desarrollo de dos etapas biológicas sucesivas: nitrificación autotrófica y desnitrificación heterotrófica.

En la etapa de nitrificación, el nitrógeno orgánico y el amoniacal, se oxidan a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mediante las bacterias nitrificantes, en presencia de oxígeno. Durante la etapa de desnitrificación, el nitrato se reduce a  $\text{N}_2$  mediante las bacterias heterotróficas desnitrificantes, en condiciones anóxicas, es decir, con ausencia de oxígeno libre, y en presencia de una fuente de carbono.

Según un artículo científico sobre microbiología publicado en 2003 afirma que: “para poder producir este proceso de desnitrificación biológica es necesario la disponibilidad de materia orgánica biodegradable, de modo que actúe como una fuente de carbono para generar material celular y como una fuente de energía para proporcionar electrones. Estas fuentes de carbono y electrones principalmente utilizadas en el proceso de desnitrificación son glucosa, metanol, etanol y acetato” [13].

#### **2.4.1.2. Biodiscos**

Este método biológico de desnitrificación de aguas, según un artículo publicado en 2017 en el Repositorio Constitucional CONICET consiste en “utilizar un reactor con la biomasa inmovilizada en un disco rotatorio. Es importante mencionar los principales factores que limitan la eficiencia de remoción de nitrógeno, como el oxígeno disuelto, el tamaño y estructura de las partículas de lodo, la forma de aeración, la temperatura, el pH, entre otros” [14]. El problema de este método es adaptar las bacterias indeseadas a las condiciones establecidas inicialmente, esto sigue siendo una limitación técnica que puede suponer a largo plazo una bajada drástica del rendimiento, afectando a su eficiencia.

#### **2.4.1.3. Tratamiento Bioelectroquímico**

Consiste en el tratamiento de aguas residuales mediante un sistema bioelectroquímico (BES), los cuales, según un artículo publicado en "Trends in Biotechnology" (2008) se definen como "sistemas electroquímicos en los que microorganismos activos electroquímicamente catalizan una reacción en el cátodo o en el ánodo. Estos microorganismos son capaces de transferir electrones extracelularmente y utilizar este mecanismo para transferirlos a un electrodo (ánodo), mientras que se están removiendo los materiales orgánicos en aguas residuales. Dicho tratamiento actúa en la remoción de compuestos orgánicos y de nitrógeno" [15].

De modo que estos sistemas, tanto el de células microbianas de combustible (MFC) y el de células microbianas de electrólisis (MEC), son consideradas a día de hoy como una de las tecnologías más prometedoras para la producción de energía aprovechando la materia orgánica existente en aguas residuales. Pero este sistema posee un problema con respecto a su aplicación a gran escala, pues no es tan simple, debido a razones microbiológicas, ya que aún es necesario resolver numerosas cuestiones técnicas y económicas [15].

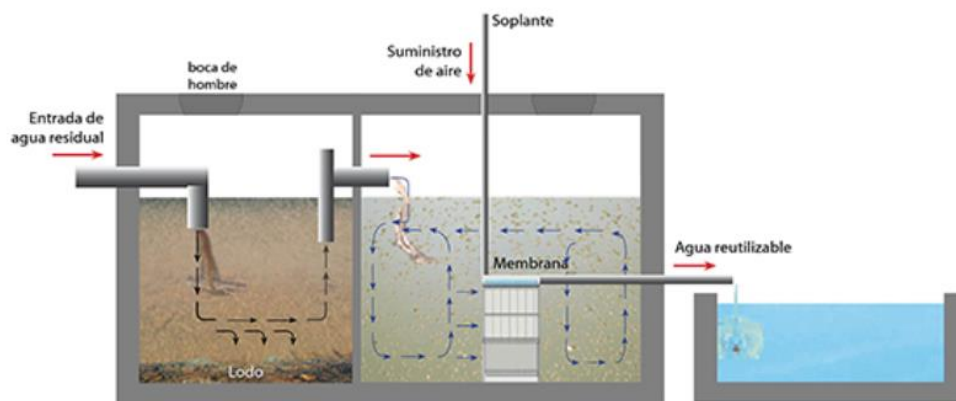
#### **2.4.1.4. Biorreactores de membrana (MBR)**

Los MBR son considerados como una prometedora alternativa para el proceso de lodos activos convencional, debido a que al conseguir la completa separación sólido/líquido por la membrana, esto nos permitirá realizar este proceso de eliminación de nitratos incluso con una mayor concentración de lodos. También cabe destacar como punto positivo a tener en cuenta, la alta calidad del efluente obtenido a través de la filtración por membranas, permitiendo poder utilizar directamente el efluente producido por el MBR, sin necesidad de aplicarle ningún tratamiento adicional, ya que los equipos MBR emplean membranas de micro o ultrafiltración de baja presión.

Según el Real Decreto 1620/2007 de reutilización de aguas depuradas, el efluente obtenido en un equipo MBR es apto para su reutilización en cualquiera de los siguientes usos [16]:

- USOS URBANOS → Para el riego de jardines, riego de zonas comunes, baldeo de calles o limpieza de vehículos.

- **USOS AGRÍCOLAS** → Usado en el riego de cultivos, riego de productos para consumo humano y el riego de pastos.
- **USOS INDUSTRIALES** → Riego de campos de golf, estanques o masas de aguas no accesibles al público.
- **USOS AMBIENTALES** → Utilizado en la recarga de acuíferos, riego de zonas verdes y en la silvicultura.



**Figura 2.4** Biorreactor de membrana (MBR)

#### 2.4.1.5. Asimilación

Este mecanismo de eliminación de nitratos se efectúa bajo dos formas [17]:

- Asimilación por microorganismos → Principalmente asociada a la utilización del carbono durante el crecimiento de los microorganismos. La mayor parte del nitrógeno asimilado microbiológicamente volverá a la fase líquida a causa de la amonificación debido a la muerte de las células. Una gran parte de este nitrógeno puede llegar a convertirse en humus.
- Asimilación por cultivo vegetal superficial → Este proceso varía estacionalmente y sólo es efectiva la remoción de nitrógeno si la cosecha se realiza permanentemente y rutinariamente. En plena operación, son capaces de eliminar una media de entre 200 y 400 kg de nitratos/ha por año, y presentan resultados en la remoción mediante la asimilación por la cobertura vegetal de 6 a 25% del nitrógeno existente en el sistema.

#### **2.4.1.6. Remoción anaeróbica**

Este proceso de remoción anaeróbica mediante el uso de microorganismos anaeróbicos oxidantes de amoníaco, lo que se conoce como “Anammox” (anaerobic ammonium oxidation). Según T.H. Martins, en su artículo publicado en 2007, expresa que: “a través de un reactor biológico de flujo ascendente y lecho fijo se podrá ejercer la remoción autotrófica de nitrógeno amoniacal en aguas residuales producidas por actividades industriales. En el Anammox la oxidación del amoníaco ocurre acompañado de la reducción del nitrito, usando carbono inorgánico (CO<sub>2</sub>) para el crecimiento microbiano” [18].

#### **2.4.1.7. Ventajas y desventajas de los procesos biológicos**

En primer lugar, hay que destacar lo económico de los procesos biológicos y lo avanzado que se encuentran con respecto a su estudio y análisis. Sin embargo, estos procesos tienen como inconvenientes que necesitan de un constante control debido a la formación de microorganismos y, además, producen lodos [19]. Según la tesis desarrolladas por C.F.Martí en la UPV en 2011, afirma que: “la desventaja principal a tener en cuenta es el gran riesgo de contaminación microbiológica del agua tratada y sus correspondientes subproductos metabólicos, provocando una gran demanda de desinfectantes o el requerimiento de un post-tratamiento como la filtración. Por último, sus bajas velocidades de producción de agua tratada y así como sus restricciones a las bajas temperaturas pueden ser considerados dos factores desventajosos de la desnitrificación biológica” [20].

#### **2.4.2. Electrorreducción**

Según el volumen 66 de la revista “Catálisis aplicada B: ambiental” (2006), expresa que este tratamiento de aguas residuales consiste en: “usar células electrolíticas empleando como mínimo dos electrodos, los cuales facilitan la circulación de corriente por medio de un circuito eléctrico, donde la superficie del electrodo facilita un cambio de electrones de las especies electrolíticas en solución”. También cabe destacar que en el ánodo se tienen las reacciones de oxidación y, en cambio, en el cátodo se tienen las reacciones de reducción.

Estas tecnologías electroquímicas garantizan aspectos positivos tales como la ausencia de requisitos para las sustancias químicas pre o tras el tratamiento de las aguas a tratar. Además, no hay producción de lodos, no ocupa un gran volumen en la planta y sus costes de inversión son relativamente bajos, es debido a esto que la reducción electroquímica por nitratos está

recibiendo cada vez más atención. Su coste económico y su capacidad de producir nitrógeno u otros compuestos de nitrógeno como producto final, son dos alicientes para muchos investigadores de este sector. Por ejemplo, cuando la concentración de nitrato es alta, muchas industrias aprovechan el amonio, ya que es el producto final deseado de la reducción y lo pueden recuperar y utilizar para la producción de fertilizantes [21].

### **2.4.3. Adsorción**

Mediante este método, el nitrato se adhiere a la superficie mediante el proceso de fisisorción o quimisorción. En este aspecto, se suele trabajar mucho con los nanomateriales debido a sus excelentes capacidades de adsorción, y a que poseen varias propiedades muy útiles tales como un área superficial innata y la funcionalización externa. Además de otros factores que determinarán su capacidad de adsorción como la alta energía de unión superficial o la falta de resistencia a la difusión interna [22].

Uno de los requisitos principales que necesitan estas técnicas de adsorción convencionales es la búsqueda de un medio adsorbente que sea vigoroso y pueda ser empleado bajo condiciones ambientales cambiantes. Algunos de los principales inconvenientes que posee este tratamiento de eliminación de nitratos es el cálculo de la eficacia del proceso de adsorción, así como su reiterada utilización y la extracción de los adsorbentes.

### **2.4.4. Electrodialisis**

La electrodialisis es considerada uno de los Procesos de Separación de Membranas (MSP), y que consiste en el tratamiento de aguas contaminadas que contienen iones de nitrato. Dicho proceso requiere de una separación selectiva por membranas de iones, transportándose iones de una solución a otra. A partir de este tratamiento surgirá una solución diluida (tratada) y una solución concentrada, ésta última, si no se usa de nuevo como fertilizante, requerirá de un tratamiento adicional, un caso como éste fue investigado por un equipo científico en el Laboratorio de Coordinación Química y Análisis, de la Facultad de Ciencias de El Jadida, Marruecos, donde analizaron la desnitrificación del agua subterránea salobre, adjuntando que el destino de las concentraciones de nitrato extraído eran la principal desventaja de este tipo de tratamiento [23].



#### **2.4.5. Ósmosis Inversa**

Proceso mediante el cual, el agua a tratar repleto de nitratos que alimenta al sistema, atraviesa una membrana semipermeable, en la cual, se producirá una variación de la presión inducida a cada lado de la membrana semipermeable actuando como fuerza impulsora. En este proceso de ósmosis inversa, la disolución a tratar posee componentes que no consiguen atravesar dicha membrana.

El concentrado salino, aparte de contener una elevada salinidad, posee una alta concentración de productos químicos, dicho concentrado es el producto de la desalinización. Debido a la gran necesidad de agua, incrementan la producción de grandes volúmenes de salmueras en las desaladoras, las cuales son desechadas, provocando severos impactos al medioambiente. Debido a esta razón, es necesario realizar una gestión eficaz de dichas cantidades de salmueras, con el fin de poder ofrecer una posible reutilización o eliminación de la manera más eficiente. Un método para hacer frente a este problema que ocurre con las salmueras durante el proceso de ósmosis inversa, es la precipitación química [24].

Asimismo, este tratamiento de eliminación de nitratos posee una serie de desventajas, tales como su sensibilidad a contaminantes diferentes del nitrato, y así como el requerimiento de una cantidad de presión específica y su propensión a la bioincrustación [22].

#### **2.4.6. Intercambio iónico**

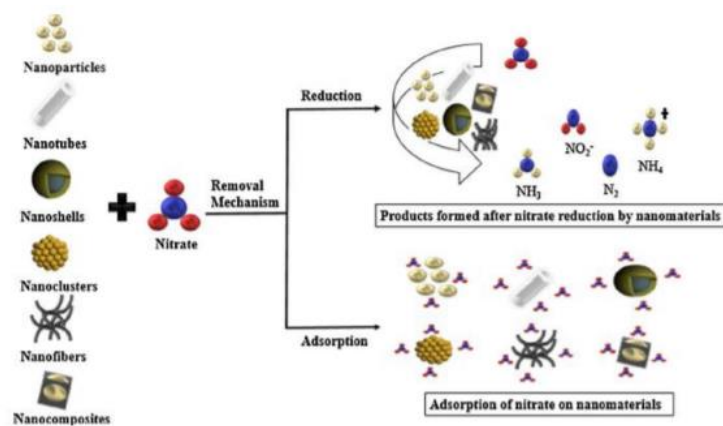
El intercambio iónico consiste en un proceso químico reversible, donde los iones, en un cuerpo sólido insoluble y permanente, se intercambian entre otros, los cuales se hallan en un medio líquido. Dependiendo de la cantidad de iones concentrados en dicha solución y de la selectividad de atracción de las resinas de intercambio, podremos discernir la dirección del intercambio. Cabe destacar la existencia de dos tipos diferentes de resina de intercambio, por un lado, se encuentran las catiónicas, y por otro las aniónicas.

Estas resinas de intercambio suelen estar conformadas por una configuración polimérica reticulada con grupos funcionales que pueden ser intercambiados. Por un lado, están las resinas catiónicas ácidas fuertes y débiles, las cuales intercambian cationes y, además, se encuentran las resinas aniónicas básicas débiles y fuertes, las cuales se emplean en la remoción de sustancias líquidas. Sin embargo, dichas técnicas necesitan de un post-tratamiento, también cabe destacar su elevada sensibilidad a diferentes elementos contaminantes existentes en el agua [22].

### 2.4.7. Catálisis heterogénea

El objetivo principal de estudio de este tratamiento ha sido estudiar investigar la remoción del ion nitrato, para poder reducirlo a nitrógeno gaseoso utilizando hidrogeno u otros agentes que faciliten la reducción. Este método de eliminación de nitratos es bastante prometedor a día de hoy, pues no presenta los inconvenientes de los métodos convencionales y, además, convierte el contaminante en  $N_{2(g)}$ .

Equipos de investigación han presentado los nanomateriales como elementos fundamentales para la eliminación de nitratos, usando componentes nanométricos como nanopartículas, nanofibras o nanotubos, entre otros. Estos materiales son usados generalmente en procesos de reducción y de adsorción [20].



**Figura 2.5.** Materiales nanométricos para la remoción de nitratos en adsorción y catálisis.

### 3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El agua es el recurso natural de nuestro planeta que permite la vida de todos los seres vivos. No obstante, es un bien muy escaso y su creciente contaminación son factores que están provocando que muchas poblaciones en todo el mundo posean un desigual acceso a este recurso tanpreciado y necesario para nuestras vidas. Se estima que la crisis mundial del agua cobrará en los próximos años proporciones sin precedentes, aumentando en muchos países subdesarrollados la penuria por falta de agua. Los recursos hídricos irán disminuyendo constantemente a causa del crecimiento de la población mundial, la contaminación y el cambio climático.

Pese al gran volumen de agua existente en nuestro planeta, sólo el 2,53% del agua total de nuestro mundo es dulce, y por si no fuera poco, de este pequeño porcentaje, aproximadamente el 70% se halla en las grandes superficies de hielo de los casquetes polares y los glaciares. Esta es la situación en la que nos encontramos y no todo el mundo es consciente de ello, pues según ciertos estudios realizados, se estima que anualmente se desechan a los océanos entre 4,8 y 12,7 millones de toneladas de plástico, lo que equivale a la preocupante cifra de que cada segundo llega a los océanos más de 200 Kg de basura, provocando en algunos casos la formación de islas conformadas por basura de microplásticos en los océanos [25].

A día de hoy, también hay otros contaminantes muy nocivos que se liberan en las masas de agua de nuestro planeta, como pueden ser los productos químicos provenientes de las industrias, metales pesados procedentes de la actividad minera, ciertos productos contaminantes provenientes del hogar y materiales radiactivos. Durante estos días se ha publicado una noticia que ha puesto en alarma a buena parte del mundo sobre este último contaminante, los materiales radiactivos, el Gobierno de Japón anunció el pasado 13 de abril la liberación del agua radiactiva tratada de la dañada planta nuclear de Fukushima al mar, esto ha provocado las críticas de numerosas naciones hacia el país nipón. Estamos hablando de elevadas cantidades de aguas contaminadas, que en septiembre alcanzaban cifras de 1,23 millones de toneladas.

Dentro de esta larga lista de contaminantes que afectan a la correcta preservación de este bien tan necesario, y así como al cuidado del medioambiente y a la biodiversidad marina, cabe destacar la contaminación hídrica proveniente de la explotación ganadera y la agricultura

intensiva, enfocándome en mayor medida en éste último a lo largo de este Trabajo de Final de Grado.

La actividad agrícola puede generar un gran número de contaminantes perjudiciales como consecuencia del uso excesivo de pesticidas, fertilizantes o herbicidas. El uso indiscriminado de estos productos en la agricultura intensiva, puede provocar graves problemas a un porcentaje considerable de la población mundial, debido a que dichos productos finalmente acaban filtrándose en la tierra, llegando a contaminar acuíferos, y así como las aguas subterráneas que posteriormente terminarán llegando al mar. Por tanto, urge diseñar y establecer políticas que permitan corregir estos problemas ambientales y avanzar hacia un desarrollo sostenible de esta actividad.

El Campo de Cartagena posee una extensión de aproximadamente 1316 km<sup>2</sup>, siendo así una de las principales cuencas dedicadas a la agricultura intensiva de regadío en Europa, constituida como una de las principales fuentes de exportación de productos hortícolas y cítricos de los mercados europeos. Las áreas de regadío intensivo ocupan a día de hoy entre el 30 y 38% de la cuenca, una superficie de entre 40.000 – 50.000 ha [26]. Durante muchos años se estuvieron vertiendo a las aguas superficiales y subterráneas una gran cantidad de efluentes procedentes de las actividades agrícolas, y así como los vertidos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y filtraciones de redes de alcantarillado, provocando un incremento considerable en la concentración de nutrientes, tales como fósforo, materia orgánica y, en mayor medida, nitratos, en las masas de agua tanto superficiales como subterráneas de nuestra región.

El acuífero del Campo de Cartagena se caracteriza por ser un acuífero multicapa, siendo la capa del acuífero del Cuaternario la más afectada, con concentraciones de nitratos entre 22 y 34 mg/L, y llegando a 45 mg/L en algunas zonas más afectadas. El problema radica en que esta agua de baja calidad constituye una de los principales suministros de hídricos para el regadío, sin embargo, para poder emplearla es necesario su desalación. Este proceso se realiza en plantas de desalación instaladas en las explotaciones de nitratos, éstas generan un residuo altamente salino y con elevadas concentraciones de nitrato, la salmuera, la cual puede ser causante de procesos de eutrofización si se libera en aguas superficiales o subsuperficiales. En los últimos años, se han ido depositando grandes volúmenes de estas aguas contaminadas por nitratos en el Mar Menor, originarios en su mayoría de efluentes y sedimentos provenientes de los campos agrícolas, provocando efectos devastadores en la biodiversidad marina, prueba de ello es la muerte de decenas de miles de especies autóctonas de esta laguna salada, llevando a la

Comunidad Europea a declarar la zona del Mar Menor – Campo de Cartagena como Zona Vulnerable a la Contaminación por Nitratos bajo la Directiva 91/676/EEC [26].

Es necesario buscar las medidas necesarias para gestionar este problema de índole ambiental, para evitar que los daños que ha recibido el Mar Menor en los últimos años se vuelvan irreversibles, y podamos de esta manera preservar la laguna hipersalina costera más grande de la cuenca mediterránea, considerada por su elevado valor ambiental y su singularidad como un humedal de importancia internacional según la Convención de Ramsar, además de Zona Especialmente Protegida de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM) y Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Otros contaminantes muy perjudiciales, dentro de la explotación ganadera, son los purines, los cuales son todos aquellos residuos de origen orgánico, una mezcla de los desechos líquidos y sólidos del ganado, los restos de nutrientes del ganado y las aguas residuales del lavado de explotación. Simplemente en el sector porcino, España genera alrededor del 20% de la producción de toda Europa, llegando a cifras de hasta más de 40 millones de toneladas de este vertido cada año. Dichos vertidos líquidos producidos de estas explotaciones ganaderas intensivas suponen un elevado aspecto contaminante en los diferentes cauces donde son vertidos, pudiendo generar inconvenientes como un exceso de nutrientes (nitratos, fósforo y potasio), así como una severa contaminación debido a altas concentraciones de nitratos en las aguas superficiales y un alto contenido de materia orgánica.

Actualmente, el empleo mayoritario que se le está dando a estos vertidos resultantes de esta actividad es como abono para el terreno, pero en muchas ocasiones, dicha concentración es excesiva, y debido a su dificultad para deshacerse de estos, termina con la contaminación de aguas, suelos y la emisión a la atmósfera de enormes volúmenes de gases nocivos. En algunos casos, la solución más eficaz pasa por la adecuación del purín para mejorar sus condiciones, eliminando el alto contenido de nitrógeno total, o eliminando los sólidos en suspensión para una mejor gestión posterior como compostaje o también existen procesos de depuración con el fin de reutilizar el agua, un bien cada vez más escaso [27].

Urge, por tanto, la necesidad de encontrar algún método prometedor de eliminación de nitratos que sea económico, persistente y que, por tanto, sea eficiente para nuestro proyecto. Para ello, no solo será necesario medir el coste del producto, sino también la instalación y la regeneración del elemento filtrante. El uso reiterado del producto empleado para la regeneración del medio filtrante y así como la comprobación de su eficiencia de regeneración, también nos será de gran utilidad. No obstante, la cuestión más importante a destacar es

conocer la efectividad del medio filtrante en el proceso de retención de nitratos en aguas, no solo de ámbito rural o industrial, sino también en aguas de plantas depuradoras y de tratamiento de agua donde se requiera de estos métodos de eliminación de nitratos. Por último, también será de gran importancia, investigar la posibilidad de usar estos nitratos retenidos en el medio filtrante, para así poder disponer del producto sin tener que comprarlo, suponiendo un ahorro considerable, y además de una seguridad en el proceso de fertirrigación, al ser eliminado de las aguas subterráneas el nitrógeno sobrante mediante el bombeo de dicha agua.

Por ello, frente a la necesidad de encontrar este método efectivo para la desnitrificación de las aguas, y unido a la idea de preservar el medioambiente mediante la mejora de la calidad de las mismas, es de real importancia la investigación en este sector para mejorar la gestión y el desarrollo de un plan de abastecimiento de las aguas disponibles, y así como unas medidas que nos permitan progresar en la preservación y mejora del medioambiente.

Por consiguiente, los objetivos a seguir para este Trabajo Final de Grado son los siguientes:

- ✓ Comparar los diferentes medios adsorbentes, determinando el más eficiente.
- ✓ Precio del proceso. Coste para la adquisición y puesta en marcha.
- ✓ Comprobar la capacidad de retención de nitratos.
- ✓ Ratificar la seguridad a lo largo del proceso de desnitrificación.
- ✓ Comprobar la flexibilidad, con respecto a la posible localización de la instalación, de este método de eliminación de nitratos.

## **4. ANTECEDENTES**

### **4.1. Métodos de eliminación de nitratos mediante tratamientos biológicos**

Como he ido explicando a lo largo de este proyecto, uno de los principales contaminantes del agua es el nitrógeno, la creciente actividad industrial y agrícola en los últimos años ha provocado una considerable subida en la concentración de nitratos en la biosfera de nuestro planeta. El nitrógeno generado por actividades antropogénicas como la agricultura, es muy probable que termine filtrándose por las capas terrestres, alcanzando las aguas subterráneas y por tanto, contaminándolas. No sólo eso, sino que, además, estos altos niveles de nitratos saturados hallados tanto en la agricultura, como en los sistemas de alcantarillado o en los medios fluviales (ríos, aguas subterráneas, arroyos...), terminarán afectando, en última instancia, a las grandes masas de agua salada, como los mares y los océanos. Por ello, es necesario encontrar diferentes tratamientos que nos permitan mantener los niveles de concentración de compuestos nitrogenados dentro de un intervalo de valores que no generen el deterioro de las diferentes masas de agua que conforman nuestra biosfera.

Por lo tanto, a lo largo de estos últimos años, debido a esta necesidad de purificar el agua disponible, han surgido diversos métodos biológicos y fisicoquímicos para la eliminación de nitrógeno del agua. Dichos tratamientos biológicos eliminan el contaminante, obteniendo finalmente, bajo condiciones ideales,  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ .

A continuación, destacaremos varios tratamientos biológicos empleados en los procesos de eliminación de nitratos en aguas.

#### **4.1.1. Lodos activos**

En primer lugar, hablaremos de los lodos activos, el cual es uno de los tratamientos biológicos más conocidos en la depuración de aguas residuales. Dentro de este método de desnitrificación hay dos tipos fundamentales, el sistema de lodos activos de flujo continuo y el sistema de lodos activos de flujo discontinuo. Ambos procesos difieren entre sí en que el proceso de depuración del primer tipo se produce en el espacio, sin embargo, el proceso de depuración del segundo depende del tiempo [28].

Mediante el proceso de lodos activos de flujo continuo o convencional, el agua residual pasará por diversos tanques, en los cuales tendrán lugar diferentes fases del tratamiento. En primer lugar, el agua residual pasará por el denominado “área de rejillas” o criba, en este tanque

se encuentran instaladas unas rejillas, las cuales retienen materiales gruesos de mayor tamaño contenidos en estas aguas, los cuales, posteriormente se retirarán de las rejillas. En el siguiente tanque nos encontramos con la “trampa de grasas” o el tanque de desengrasado, desarenado o de neutralización, en donde se eliminan los materiales tales como aceites, grasas o cualquier otra sustancia de menor densidad que el agua, pues al quedarse en la superficie del agua, quedarán bloqueadas en el primer compartimento de este tanque. A continuación, pasamos al tanque de aireación, en el cual, los difusores de burbuja fina insuflan aire en el agua residual con el objetivo de que las bacterias aeróbicas degraden la materia prima contaminante. Posteriormente, se encuentra el clarificador, que tiene como objetivo separar por sedimentación el agua tratada del lodo. Por tanto, por un lado tendremos el agua tratada proveniente del clarificador, la cual llegará al área de cloración, aquí se empleará un clorinador para destruir las bacterias patógenas, haciendo que el agua esté lista para ser reutilizada, y por otro lado, el lodo separado del clarificador se recirculará mediante conductos al tanque de aireación donde los difusores de burbuja fina lo mantendrán aireado, dicho lodo será retirado más tarde periódicamente al tanque de lodos o “eras de secado”, para aplicarle su correspondiente proceso de deshidratación, para poder reducir su volumen, permitiendo de esta manera, un fácil manejo y así como un fácil retiro de la planta, para emplearlo posteriormente en la obtención de abono agrícola o biogás.



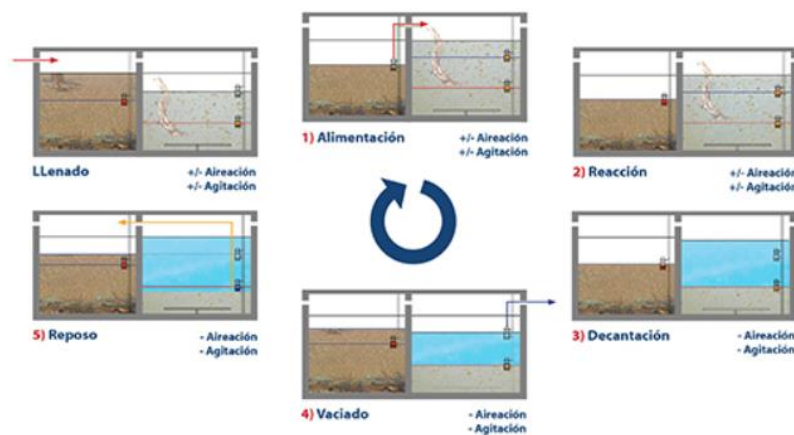
**Figura 4.1** Proceso de lodos activos de flujo continuo o convencional

En cambio, a través del tratamiento de lodos activos de flujo discontinuo, se realizarán todas las diferentes fases de desnitrificación en un solo tanque, conocido como Reactor Biológico Secuencial (RBS). Son reactores discontinuos donde el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado, permitiendo combinar en un único tanque, los procesos de reacción, aeración y clarificación. Cabe destacar como ventajas principales de los Reactores Biológicos Secuenciales, el empleo de un único tanque, permitiendo reducir en gran medida la



inversión necesaria, prueba de ello es el ahorro de tuberías y bombeos, pues es innecesario recircular los lodos, también permite una mayor facilidad de operación, una mejor flexibilidad ante variaciones de concentraciones y caudales de las aguas residuales a tratar [29], además, gracias a que el proceso se produce en un estado de reposo total del líquido de mezcla, permite una eficacia superior durante la etapa de decantación y un mejor control para evitar la proliferación de organismos filamentosos.

Aunque también existen varios requisitos que debemos tener en cuenta para el correcto control y mantenimiento de estos reactores RBS. Por ejemplo, la instalación de un instrumento de vaciado flotante, que se mantenga sobre la superficie del líquido de mezcla y que vaya oscilando con el nivel del mar durante la etapa de vaciado, así como realizar un constante control y mantenimiento de las válvulas de vaciado y llenado, y de los diferentes mecanismos de aireación y agitación, y llevar a cabo un control exhaustivo del caudal y del estado de las aguas residuales afluentes, con el fin de adaptar el ciclo operativo según los niveles de los tratamientos requeridos.



**Figura 4.2** Reactor discontinuo secuencial (RBS)

Como se puede observar, las distintas etapas de tratamiento se van sucediendo durante un determinado intervalo de tiempo, denominado ciclo, su duración va a depender de las metas de depuración deseadas. Cuando finalice un ciclo del tratamiento, se irá repitiendo sistemáticamente.

Realizando una comparativa entre ambos procesos de lodos activos, los valores de rendimiento óptimos para la eliminación de nutrientes dictaminados por la Directiva 91/271/CEE son bastante mayores en comparación a los rendimientos conseguidos mediante un tratamiento biológico convencional, esto unido a la elevada flexibilidad del tratamiento

discontinuo (SBR), facilita en gran medida la eliminación de estos nutrientes, llegando a los niveles de eficiencia óptimos y deseados. Por tanto, para promover la purificación de estas aguas residuales, es de gran ayuda establecer fases en condiciones ambientales idóneas para procurar estos mecanismos de asimilación o eliminación de nutrientes (nitrógeno o fósforo) por parte de los microorganismos [30].

#### **4.1.2. Biodiscos**

Considerado uno de los sistemas más recientes para el tratamiento de aguas residuales, también conocido como Contador Biológico Rotatorio (CBR). Es un sistema de tratamiento biológico secundario empleado para la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y para la purificación de efluentes nitrificados. Este método fue utilizado por primera vez en Alemania en el año 1900, y posteriormente en Estados Unidos en 1929. En aquellos tiempos, eran construidos con madera. Hasta que en 1950 comenzaron a realizarse las primeras pruebas con discos de plástico y de poliestireno expandido. Su uso en plantas de tratamiento de aguas residuales tuvo que esperar hasta el año 1957, y no fue hasta 1969, en Alemania, donde tuvo lugar la primera planta de tratamiento de aguas residuales mediante el empleo de este novedoso método. A lo largo de estos últimos años ha habido grandes mejoras en este proceso, consiguiendo valores de eficiencia en la eliminación de nitratos bastante óptimos.

El proceso de purificación de las aguas residuales mediante los biodiscos consiste en la remoción, bajo condiciones aeróbicas, de la materia orgánica soluble y coloidal existente en dichas aguas residuales. La dimensión de estos discos varía entre unos 3 ó 4 metros de diámetro, normalmente son de materiales plásticos como PVC, polipropileno, entre otros. Están colocados sobre un eje horizontal e instalados en un tanque de concreto. Dichos discos, parcialmente reducidos en el agua residual, giran en torno al 1 y 2 r.p.m., dentro del tanque de concreto. Lo interesante de este proceso es la adhesión y la multiplicación de los microorganismos existentes en las aguas residuales en la superficie de los discos, creándose una película fina biológica, denominada biomasa, de un espesor de 2 a 4 mm.

Conforme el sistema permanece rotando a través del agua residual, una fina película de agua residual formada por dicha rotación del reactor, absorberá oxígeno del aire, y además, los organismos contenidos en la biomasa de los discos removerán la materia orgánica soluble aeróbicamente, estabilizando la materia orgánica en componentes más simples, en presencia del oxígeno. También hay que destacar en este proceso, las fuerzas de fricción ejercidas sobre la película biológica durante la rotación de los discos dentro del agua residual. Esto permitirá el desprendimiento de la biomasa excedente, para su posterior separación, mediante

sedimentación, del agua tratada, y así como permitir unos valores constantes de grosor de la biomasa en dichos discos.

El sistema dispone como mínimo de 4 etapas o secciones, por medio de las cuales el agua irá siendo tratada y purificada, para su posterior reutilización. Dichas etapas operarán mediante un mezclado completo, manteniendo constantes el crecimiento de la película biológica y el desprendimiento de biomasa. Las diferentes etapas se comunicarán entre sí a través de un orificio que permite el flujo de agua.

El tratamiento biológico mediante biodiscos presenta una serie de variables que pueden afectar al proceso, tales como la temperatura, la alcalinidad, el pH, la salinidad (conductividad), la carga orgánica, la recirculación del efluente, la velocidad de giro y el número de etapas.



**Figura 4.3** Sistema de Biodiscos



**Figura 4.4** Planta de tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos

Por último, es importante enumerar una serie de ventajas e inconvenientes que podemos encontrar en este sistema de tratamiento biológico. En primer lugar, comenzaré por las principales ventajas [31]:

- No genera problemas de contaminación acústica.
- Se pueden eliminar la sedimentación del agua antes de entrar al biodisco.
- Los biodiscos poseen una rápida recuperación tras la entrada de tóxicos al proceso.
- La rotación de los discos elimina los excesos de biomasa existentes en los discos, evitando, por tanto, la instalación de un equipo de lavado.
- Fácil instalación de ampliaciones del sistema, nuevos módulos de biodiscos se pueden añadir fácilmente.
- No se generan espumas durante el tratamiento de desechos.
- Requerimiento de un área de tratamiento menor con respecto a otros tratamientos biológicos.
- Alta eficiencia de remoción de carbono y nitratos.

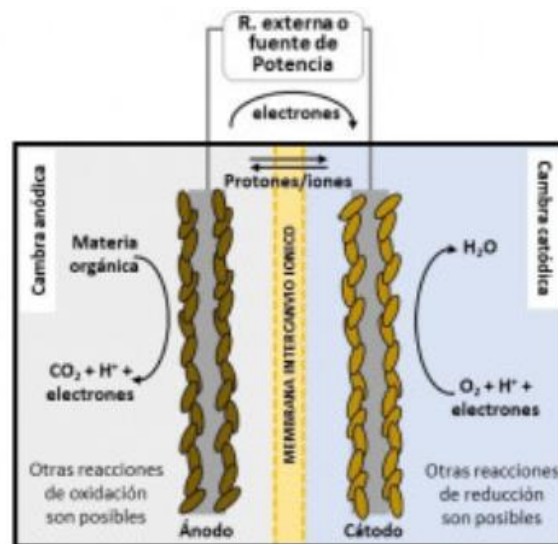
Y a continuación, destacaré los inconvenientes más importantes con los que nos podemos encontrar empleando este tratamiento biológico:

- Proceso relativamente nuevo, escasea los parámetros de diseño definidos.
- Posee un modelo matemático complejo, debido a la presencia de los 3 estados de la materia.
- Requiere de un tiempo excesivamente largo para conseguir una óptima estabilidad.
- Un coste del sistema bastante elevado.

#### **4.1.3. Tratamiento Bioelectroquímico**

Recientemente, ha aumentado el interés de investigar y desarrollar tecnologías novedosas que nos faciliten la recuperación y reutilización de los recursos de las aguas residuales mientras que se produce su depuración. De esta manera, dejamos de considerar las EDARs solamente como zonas donde se produce el tratamiento de aguas contaminadas, y las consideraremos también como plantas de extracción de recursos, tales como energía y nutrientes. Estas tecnologías encargadas de realizar esta tarea son los sistemas bioelectroquímicos (BES), la cual surge debido a la fusión de la electroquímica y la biotecnología. Los sistemas BES poseen electrodos de tipo ánodo y cátodo en el interior de reactores biológicos. Dichas tecnologías BES catalizan diferentes reacciones de reducción y de oxidación para poder así reutilizar elementos

extraídos del agua residual, gracias a microorganismos adheridos sobre los electrodos. Por tanto, no cabe duda de que el empleo de este tipo de sistemas BES, generan una mejor eficiencia energética y un óptimo rendimiento en los recientes sistemas de tratamiento de aguas de carácter residual, permitiéndonos recuperar recursos para una adecuada reincorporación al medioambiente o para destinarlo en la producción de otros elementos de gran interés como el biogás (biometano), el cual es utilizado para producir energía térmica y/o eléctrica.



**Figura 4.5** Esquema de un sistema bioelectroquímico

La primera utilización de estas novedosas tecnologías BES, se empleó en las baterías microbianas de combustible, empleadas para la producción de electricidad al mismo tiempo que depuran aguas e carácter residual, pues los cuerpos orgánicos existentes en el agua residual serán oxidados a causa de los microorganismos adheridos en el ánodo. Este proceso de oxidación generará electrones que serán transferidos al ánodo para la obtención de energía eléctrica.

Esta novedosa tecnología empleada en el tratamiento de aguas residuales es uno de los focos de investigación actuales que más interés tienen en la comunidad científica. Muchos de estos proyectos, aún están en proceso de desarrollo y de investigación subvencionados por la Comisión Europea. A continuación, trataré de explicar ciertos proyectos de gran interés para obtener así una amplia visión de los importantes usos de los sistemas bioelectroquímicos [32].

En primer lugar, nos encontramos con el proyecto MIDES “Microbial Desalination for Low Energy Drink Water”, el cual consiste en elaborar un método más eficiente en el proceso de desalinización de aguas salinas que suponga, a su vez, un menor coste energético. La estrategia principal para conseguir esto según este equipo de investigación es la utilización de sistemas BES, lo denominan una “Microbial Desalination Cell” (MDC), como un tratamiento previo a la

ósmosis inversa. Según el estudio realizado por este equipo de investigación, aproximadamente el 70% de las plantas desalinizadoras emplean la ósmosis inversa, suponiendo gastos energéticos de alrededor de 3kWh / m<sup>3</sup> de agua desalinizada. En cambio, utilizando la MCD, podemos obtener energía eléctrica a partir de la degradación de la materia orgánica existente en el agua residual, dicha energía será empleada para el mismo proceso de desalinización, mediante un proceso semejante a la electrodiálisis, consiguiendo de esta manera un ahorro energético bastante prometedor, reduciendo el consumo energético hasta los 0,5kWh / m<sup>3</sup>.

Otro proyecto muy interesante a tener en cuenta, es el proyecto Run4Life “Recovery and Utilization of Nutrients 4 Low Impact Fertilizers”. Dicho proyecto posee un objetivo principal, desarrollar e implantar procesos no centralizados de recuperación y depuración de nutrientes, para poder así gestionar las aguas residuales que se generan por medio del uso doméstico, como puede ser la recuperación de nitrógeno amoniacal presente en las aguas residuales de origen doméstico. Con el fin de obtener un producto fertilizante aprovechando dichas aguas residuales, el Centro Tecnológico Leitat ha desarrollado un sistema BES, mediante el cual consiguen tratar el material orgánico del agua negra en la cámara anódica de un reactor bioelectroquímico. En dicha cámara, los iones amonio pasarán a la cámara catódica, donde se convertirán en amoniaco, posteriormente una circulación de aire expulsa el amoniaco. Dicha corriente repleta de amoniaco se burbujeará en una “trampa ácida”, produciendo una sustancia acuosa de nitrato de amonio (fertilizante). Los resultados obtenidos gracias a este proyecto de investigación han revelado que esta tecnología elimina hasta el 82% de N<sub>2</sub> de las aguas residuales y permite la recuperación aproximadamente del 61% como fertilizantes.

Por otro lado, el proyecto Greener “Integrated systems for Effective Environmental remediation”, se encarga del estudio y desarrollo de nuevas tecnologías sostenibles y de bajo coste para la eliminación de contaminantes en la biosfera derivada de las actividades antropogénicas que tanto daño hacen a los lagos, ríos, acuíferos y suelos. Por tanto, con el objetivo de disminuir los contaminantes en las aguas y sedimentos, empresas como Leitat, emplearán la tecnología BES para poder eliminar elementos nocivos tales como hidrocarburos, antibióticos, metales y pesticidas.

Por último, también es de real importancia comentar otro de los usos que se le está dando a esta tecnología BES, según centros de investigación, estos tratamientos bioelectroquímicos pueden ser empleados como sistemas de almacenaje de electricidad, lo cual es de gran utilidad para la introducción de las energías renovables al sistema eléctrico. De esta forma, Leitat ha desarrollado los sistemas Power-to-gas, destinadas al almacenamiento de grandes cantidades

de energía en un vector energético gaseoso, convirtiendo el  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ , proceso denominado electrometanogénesis.



**Figura 4.6** Prototipo de electrometanogénesis desarrollado por Leitat

En definitiva, los sistemas BES son producidos debido a la fusión entre los procesos electroquímicos y biotecnológicos, generando un menor consumo energético asociado a su operación, provocando que estos novedosos sistemas sean de gran interés dentro de la comunidad científica debido también a su amplio campo de aplicación mencionado anteriormente. Sin embargo, las tecnologías BES, en su gran mayoría, están aún en la etapa de desarrollo y requieren todavía de su validación más allá del laboratorio, para poder confirmar con total seguridad que son tanto tecnológica como económicamente competitivas en comparación con las otras tecnologías empleadas actualmente en el tratamiento biológico de aguas de carácter residual [32].

#### **4.1.4. Biorreactores de membrana (MBR)**

Este tratamiento biológico se produce por la sinergia de dos procesos básicos, la separación por membrana y la degradación biológica. Mediante este sistema, a través de un sistema de ultrafiltración, es posible la separación de sólidos en suspensión y microorganismos en aguas residuales, teniendo por tanto un control total de la biomasa del efluente desinfectado.

La tecnología MBR nació alrededor de 1969, donde el decantador secundario usado habitualmente en los tratamientos de aguas fue sustituido por una membrana de ultrafiltración. Dichas investigaciones ofrecieron datos sorprendentes de disminución de contaminantes en las aguas residuales, llegando incluso a valores cercanos al 98%. Sin embargo, este primer modelo también presentaba ciertas desventajas tales como un elevado gasto de energía con el objetivo

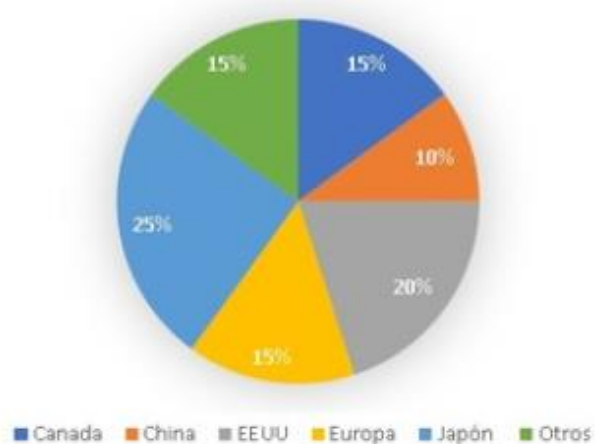


de ejercer la correspondiente filtración a través del sistema de membranas, así como un elevado coste de inversión y un alto gasto en el mantenimiento [33].

Pese a estos inconvenientes económicos, la alta efectividad era muy prometedora, por lo que grandes potencias mundiales comenzaron a investigar cada vez más a fondo este sector, con el fin de obtener un módulo de membranas más económico. Para ello, se llevaron a cabo ciertas modificaciones, las cuales destacaban su trabajo a presiones negativas e incluir un sistema de circulación de aire, de manera subsiguiente las necesidades energéticas se redujeron, lo que conllevó una bajada en la inversión inicial, y así como en los costes por explotación y mantenimiento. Haciendo más atractivo ante el mercado este tipo de tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales.

Actualmente, un gran número de países adoptaron este sistema. En Europa, no se produjo un aumento notable de instalaciones de este tipo de tratamientos hasta 2005. En España, se ha producido un gran crecimiento en lo que respecta al volumen de instalaciones de sistemas MBR, ubicándose en Lanzarote, la primera planta destinada a este tratamiento, en el año 2002. Cabe remarcar que la utilización de esta tecnología no solo ha supuesto un ahorro en los costes de instalación y mantenimiento, sino que, además, ha permitido ayudar a controlar la contaminación en aguas residuales cumpliendo con los requisitos dictaminados por su correspondiente normativa. A continuación, mostraré un gráfico donde se podrá observar la extensión de la tecnología MBR a nivel mundial:

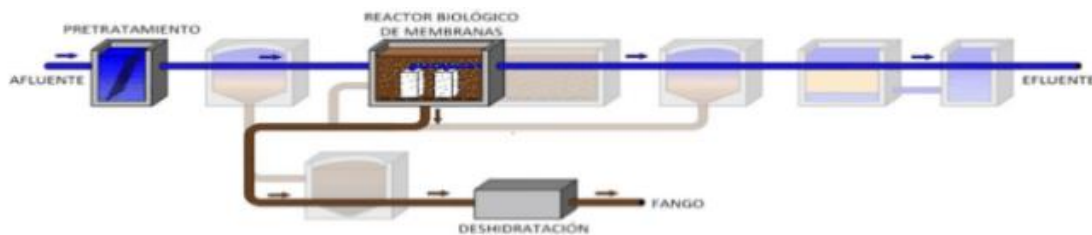
### Implantación MBR a nivel mundial



**Figura 4.7** Gráfico de la distribución mundial del tratamiento MBR. *Fuente: Elaboración Bluegold*



Con respecto a la tecnología MBR, es considerada la evolución del proceso convencional de fangos activos, de modo que empleando esta tecnología separativa es posible disminuir y quitar fases de un tratamiento convencional, pudiendo prescindir de la etapa de decantación secundaria. Además de las ventajas de índole económico y su elevada eficacia, también se ha demostrado que son capaces de eliminar el 99% de los sólidos en suspensión, alcanzando valores de DQO y de DBO del 95 y 98%, respectivamente [33].



**Figura 4.8** Esquema de sistema MBR en comparativa con un sistema convencional de lodos activados

Para llevar a cabo este proceso de tratamiento de aguas mediante el uso de un “Reactor Biológico de Membranas” es necesario separar el proceso en estas etapas:



**Figura 4.9** Etapas del sistema MBR. Fuente: *Elaboración Bluegold*

A continuación, hablaré brevemente de las tres primeras etapas que son las que gozan de especial importancia dentro de este tratamiento por membranas.

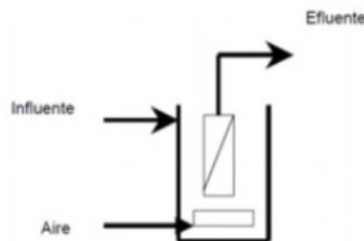
- **Pre-Tratamiento:** Fase preventiva para evitar daños al sistema. En esta etapa se eliminarán las grandes partículas y sólidos en suspensión, las cuales se cribarán para garantizar el adecuado funcionamiento del equipo. Uno de los sistemas de cribado más empleados en la tecnología MBR son los tamices rotatorios de incluso 1mm para conseguir desechar sólidos y poder eludir así la posible suciedad existente en el sistema.
- **Proceso biológico:** Parte desarrollada en el reactor biológico, la cual está conformada por dos etapas oxidantes, una etapa anaerobia y otra etapa aerobia. La etapa anaerobia dependerá del volumen que pueda ser utilizado para la incorporación del MBR, de la propia necesidad del proceso y de la calidad del efluente. Para conseguir la correcta

depuración de las bacterias, así como la adecuada prevención de la sedimentación y formación de flóculos, esta etapa necesita de un proceso de aireación y de agitación con el fin de proporcionar oxígeno. El correcto funcionamiento del sistema va a depender en gran medida de tener un nivel adecuado de oxígeno.

- **Separación sólido-líquido:** A partir de la utilización de membranas de microfiltración ( $0,1 - 1 \mu\text{m}$ ) o de ultrafiltración ( $0,01 - 0,1 \mu\text{m}$ ), realizaremos la disyunción sólido-líquido. En función de la colocación de dicha membrana podremos diferenciar dos tipos principalmente:

- **Biorreactor con membrana integrada sumergida**

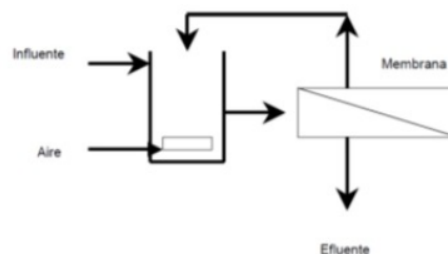
Con este tipo de disposición, la membrana está zambullida en el biorreactor, de esta manera podremos observar de dos formas diferentes la fuerza impulsora, en primer lugar, mediante la presurización del tanque o por la presión negativa.



**Figura 4.10** Esquema de biorreactor de membrana de configuración interna

- **Biorreactor con membrana externa**

En dicho modelo, la membrana se halla zambullida en un recipiente localizado fuera de la unidad biológica. La fuerza impulsora es la propia velocidad del caudal. Mediante esta alternativa, el sistema de filtración puede trabajar con presiones tanto negativas como positivas, destacando los sistemas de presión negativas por su menor coste de operación.



**Figura 4.11** Esquema de biorreactor de membrana de configuración externa

**Parámetros clave de la membrana [34]:**

- Caudal unitario (*flux*) → Caudal de permeado por unidad de área de membrana, los valores habituales estarían en torno a  $14 - 25 \text{ L / h}\cdot\text{m}^2$  (para una concentración de sólidos en el reactor  $< 15.000 \text{ mg/L}$ ).
- Presión transmembrana → Consiste en la diferencia de presión entre la entrada y el permeado. Para permitir el paso del agua residual a través de la membrana de fibra hueca, se producirá una succión del agua al interior de la fibra y las partículas existentes en el agua residual quedarán retenidas. Este proceso es de gran importancia, pues afectará al coste energético, ya que conforme vamos reteniendo partículas en la superficie de la membrana, esos orificios por donde puede pasar el agua reducen su superficie de paso, y por tanto esto se traduce en más pérdidas de carga y un aumento de la presión transmembrana.
- Ensuciamiento (*fouling*) → La acumulación de los compuestos que no deja pasar la membrana provoca la reducción del caudal unitario. Por tanto, conforme se vaya utilizando este tratamiento mediante membranas, mayor cantidad de componentes quedarán atrapados en su superficie o en el interior de los poros, reduciendo de este modo la permeabilidad de la membrana, lo cual conllevará un aumento de la fuerza de succión para obtener el mismo volumen de agua que recogíamos inicialmente.
- Limpieza → El ensuciamiento determinará la frecuencia de limpieza de las partículas de la superficie de la membrana, inyectando corrientes de agua limpia a contracorriente desde el interior de la membrana hacia dentro del reactor. Otro de método de limpieza consiste en un flujo tangencial de burbujas de aire que generan turbulencias en la membrana, evitando la formación de incrustaciones en su superficie. Existe una diferencia con respecto a la limpieza entre ambos tipos de membranas, pues el mantenimiento por limpieza de las membranas sumergidas es inferior en comparación con el de membranas externas, debido a que los sistemas de membrana externa emplean valores de presión transmembrana ligeramente superiores.

**Comparación entre ambas configuraciones (membrana sumergida y membrana externa)**

Por lo tanto, considero de real importancia crear una tabla donde podamos recoger las principales características comparativas entre ambos tipos de configuración de membrana:

**Tabla 4.1** Comparativa de ambas configuraciones MBR

MEMBRANA SUMERGIDA	MEMBRANA EXTERNA
Elevados costes de aireación (90%)	Bajos costes de aireación (20%)
Bajos costes de bombeo	Altos costes de bombeo (60-80%)
Flujo leve (menos compacto)	Flujo elevado (más compacto)
Baja frecuencia de limpieza	Frecuencia de limpieza alta
Costes de operación bajos	Costes de operación altos
Inversión inicial alta	Inversión inicial baja

### Ventajas y desventajas del sistema de tratamiento de aguas MBR

Por último, analizaré cuales son las ventajas y desventajas más importantes a tener en cuenta en dicho tratamiento con membranas [34]:

- **Ventajas MBR:**
  - **Elevada calidad del efluente**, llegando incluso a la desinfección mediante el uso de membranas de ultrafiltración.
  - **Nos permite independizar el “tiempo de retención celular” del “tiempo de retención hidráulico”**, que son los tiempos en los que está el agua y las partículas dentro del reactor (**TRC**) y el tiempo en el que está el agua (**TRH**). Esta característica nos permitirá operar **con tiempos de retención muy elevados**, lo que va a dar lugar a **menores producciones de fango** y nos permite poder **tratar aguas con contaminantes de lenta biodegradabilidad**.
  - **Eliminación de los problemas de sedimentación** tales como la presencia de filamentosas, la flotación por desnitrificación y la limitación de sólidos suspendidos en el reactor, debido a que hemos eliminado el decantador secundario.
  - **La concentración de sólidos suspendidos en el reactor entre 8.000 – 12.000 mg/L**, siendo por tanto un **sistema bastante compacto**, trabajando al doble o incluso al triple de concentración que un sistema convencional de lodos activados (2.000 – 4.000 mg/L), lo cual se traduce en una reducción en el volumen del reactor.
  - **Gran versatilidad y capacidad de tratamiento**, pudiendo emplear este tratamiento de aguas residuales tanto en industrias como en espacios

municipales, pudiendo encontrar aplicaciones de ámbito municipal o residencial en la reutilización de aguas de riego de jardines o llenado de estanques y piscinas, o su uso en depuradoras municipales. En el sector industrial, destacamos su uso en aguas residuales de mataderos, bodegas de vino e industrias de producción alimenticia, y en la limpieza de materiales de la industria marítima.

- **Inconvenientes MBR:**

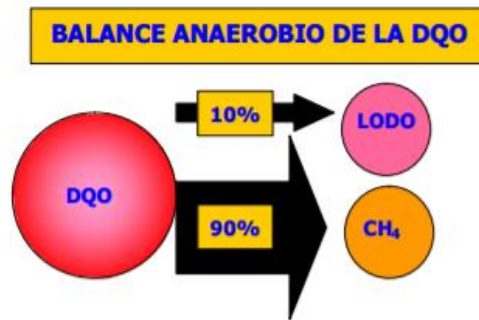
- Elevados costes de inversión de las membranas.
- Vida limitada de la membrana.
- Elevados costes energéticos, al obtener el permeado por succión.
- Control del ensuciamiento de la membrana.

En definitiva, los reactores biológicos de membrana (MBR), permiten obtener un efluente de muy alta calidad, reduciendo las necesidades del espacio ocupado por el EDAR, a costa de un consumo energético relativamente importante y de la necesidad de personal técnico cualificado y especializado en el funcionamiento de esta tecnología.

#### **4.1.5. Tratamiento anaerobio**

El tratamiento de aguas residuales domésticas se realiza aplicando una combinación de procesos físico-químicos y biológicos, para la adecuada remoción de sólidos sedimentables, disueltos y en suspensión, materia orgánica, metales, nutrientes y microorganismos. Los procesos aerobios necesitan oxigenación continua, lo que supone un encarecimiento del proceso y la formación de grandes cantidades de lodos no estabilizados y que requieren de un post-tratamiento. Debido a esto, en las últimas décadas, ha surgido un gran interés en el tratamiento de aguas residuales mediante procesos anaerobios, con diferentes niveles de carga orgánica [35].

El tratamiento anaerobio consiste en un sistema de transformación del material orgánico, al no haber un elemento de oxidación en el sistema, la habilidad de transferir electrones de la materia orgánica no varía en el metano generado. Dicha ausencia de oxidación se traduce en una equivalencia casi completa del DQO de la materia orgánica digerida en metano (90 – 97%), mientras que una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 – 10%). Durante las reacciones bioquímicas que se producen en la digestión anaerobia, tan solo una reducida parte de la energía libre es liberada, mientras que una gran parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido [36].



**Figura 4.12** Balance anaerobio de la materia orgánica. *Fuente: www.uasb.org*

La tecnología de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de procesos anaerobios se encuentra verdaderamente bien consolidada, destacando como ventajas más importantes, un menor coste de instalaciones, proceso más económico ya que al no ser necesario el suministro de oxígeno, supone un menor requerimiento energético, además es importante remarcar su baja producción de lodos si se compara con los sistemas aerobios. Otra ventaja es su capacidad de adaptación a un medio más compacto, lo que supone una menor área de instalación más reducida. Sin embargo, estos sistemas también presentan ciertas desventajas, pues requieren un mayor TRH (Tiempo de Retención Hidráulico), así como un mayor tiempo de aclimatación lo que dificulta el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y así como el tratamiento de aguas residuales con bajas cargas orgánicas. Además, este tipo de tecnologías anaerobias necesitan de un post-tratamiento para su reutilización.

Este método de saneamiento de aguas residuales es muy eficaz en países de regiones de clima tropical y subtropical, donde las temperaturas no bajan de los 20°C, en estos casos, la digestión anaerobia es una tecnología clave que genera subproductos como bioenergía, nutrientes y agua para su reutilización. Se ha demostrado que, en regiones con estas características, como la mayoría de países de América Latina, donde se encuentran la mayor concentración de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) anaerobias, siendo el reactor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) el de mayor aplicación para el tratamiento de agua residuales domésticas, se han obtenido valores de eficiencia de reducción entre 65 – 80% de DQO y un tiempo de retención hidráulico de 6 y 10 horas [37]. No obstante, es necesario continuar avanzando en la mejora de los actuales sistemas de tratamiento anaerobios que cumplan todas las correspondientes normativas de cuidado del medioambiente, y que sean adecuadas a las condiciones socioeconómicas y culturales propias de cada región.

## 4.2. Electrorreducción

La electrorreducción es un método electroquímico de gran utilidad, y es de gran interés actualmente, debido a su aplicación en la eliminación de metales pesados en dichas aguas, así como en la desalación de masas de agua y en el tratamiento de residuos con una elevada presencia de material orgánico de difícil gestión por tratamientos biológicos, por ejemplo, aguas residuales con elevados valores de DQO, o con una alta presencia de fenoles, colorantes, entre otras sustancias. Por ello, asociaciones de investigación como el “Grupo de Electroquímica Aplicada y Electrocatálisis” (LEQA) de la Universidad de Alicante, han desarrollado una serie de proyectos de esta índole, destinados a clarificar las diferentes características de estos tratamientos electroquímicos, y así como sus aplicaciones más importantes y principales ventajas que refleja este tratamiento de aguas residuales.

La electroquímica conforma dos diferentes sistemas a los tratamientos convencionales, con el fin de tratar vertidos de elevada concentración orgánica, dichos sistemas son la electrocoagulación y la electrooxidación, la cual puede ser indirecta o directa.

### 4.2.1. Tratamiento por electrooxidación

Dicho tratamiento supone un superior importe económico que los tratamientos convencionales. No obstante, esta tecnología de electrooxidación también presenta una serie de ventajas de gran interés [38]:

- Esta metodología se caracteriza por su gran versatilidad, pues es empleado como tratamiento en un amplio abanico de problemáticas medioambientales que tanto afectan a la biosfera, tales como la reducción de DBO y DQO, la decoloración o la eliminación de la turbidez en aguas y de elementos biodegradables, entre otras...
- La electricidad actúa como reactivo, la cual además de que no produce restos y elude inconvenientes relacionados con el almacenamiento y stock, además de ser considerado de bajo coste y de disponibilidad inmediata.
- Es sencillamente escalable y automatizable.
- Dicho tratamiento tiene la capacidad de poder interrumpirse y continuarse cuando deseemos, mediante el cortocircuito eléctrico proporcionado en los electrodos.

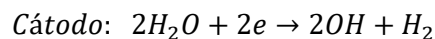
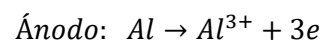
La utilización de mayor interés de este tratamiento radica en su uso como pretratamiento en vertidos de sustancias con una alta concentración de sustancias tóxicas, las cuales son

reducidas en parte a componentes biodegradables, con el fin de que dichos vertidos tengan la capacidad de ser llevados a una depuradora biológica.

Por otro lado, considero importante destacar el tratamiento de electrooxidación indirecta, el cual consiste en la generación "in situ" de cloro e hipoclorito. La producción de cloro o hipoclorito está controlada constantemente por la corriente que recorre la célula. Tanto el cloro como el hipoclorito se producen en el ánodo y, posteriormente, se consumen cuando se oxida el material orgánico, evitando problemas relacionados con el transporte y almacenamiento durante los procesos tradicionales de oxidación química con dichos elementos. El agua marina, el HCl o, en ocasiones, los cloruros existentes en las aguas residuales, se encuentran entre los reactivos más empleados para dicho tratamiento.

#### 4.2.2. Tratamiento por electrocoagulación (EC)

Tratamiento electroquímico relacionado con la coagulación química, esta metodología es bastante interesante y muy útil en el tratamiento de numerosas aguas a tratar con problemáticas por una alta concentración en DQO, DBO, metales pesados, grasas y aceites, y así como en tratamientos de eliminación del color de las aguas. Este sistema requiere la utilización de corrientes eléctricas a un "ánodo de sacrificio" de aluminio, en el interior de un tanque de procesos. A continuación, expresaré las reacciones anódicas y catódicas que se generan durante este tratamiento electroquímico [38]:



Mediante estas reacciones se generan iones aluminio que actúan como coagulantes, además de la formación de burbujas gaseosas, facilitando la flotación y provocando la posterior separación de lodos por filtración.

Este tratamiento de electrocoagulación presenta ciertas características y ventajas de gran interés, tales como:

- El equipo necesario para este sistema es bastante sencillo, automatizable y de fácil operación, además, presenta la característica de que no posee partes móviles, lo cual reduce el importe por mantenimiento.
- Dichas aguas tras el correspondiente tratamiento se vuelven inodoras e incoloras.



- La electrocoagulación actúa en ausencia de reactivos químicos, eliminando complicaciones de almacenamiento o stock, asimismo, produce un menor volumen de lodos que el proceso de coagulación química, y no solo eso, sino que además dichos lodos retienen poca humedad, minimizando de esta manera los costes de tratamiento y gestión de éstos.
- La formación de burbujas mejora la eficiencia durante el proceso de floculación.

La electrocoagulación presenta un gran interés por su amplia aplicación en el sector de la industria textil, empleándose dicho tratamiento para la precipitación de colorantes, tensioactivos, productos de estampación, entre otras útiles aplicaciones. De modo que aplicando este sistema electroquímico en las distintas fases de la formación de tejidos, generaremos efluentes incoloros, con ausencia de sustancias altamente tóxicas, y que presentarán unos niveles de DQO y conductividad dentro de los parámetros correctos de vertido.



**Figura 4.13** Muestra de agua procedente de una industria textil, antes y después de su tratamiento por electrocoagulación y filtración.

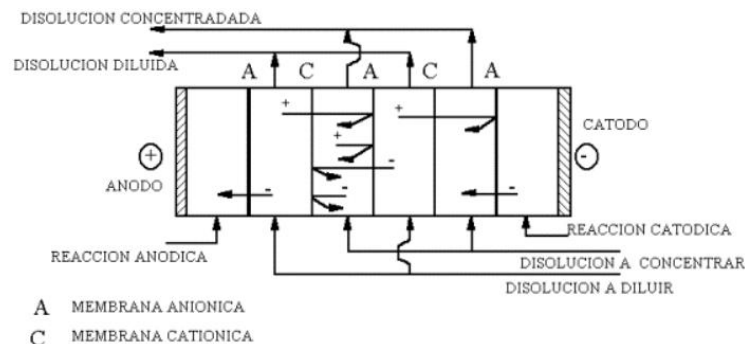
### 4.3. Electrodialisis

Frente a la problemática situación actual con respecto a la contaminación de una buena parte del agua disponible de este planeta, siendo la contaminación por nitratos una de las más perjudiciales y preocupantes de las masas de aguas superficiales y subterráneas, surge este tratamiento de aguas residuales, llamado electrodialisis, el cual ya ha demostrado tener un alto nivel de fiabilidad y eficacia para remover nitratos de las aguas.

La electrodialisis puede definirse como una tecnología de membrana que permite extraer sustancias ionizadas disueltas en una disolución acuosa por medio de membranas de

intercambio iónico, bajo la influencia de un campo eléctrico continuo como fuerza directora. En dicho proceso de separación, se genera una diferencia de potencial que hace posible el movimiento de los iones. Este proceso se lleva a cabo en un equipo con forma de filtro prensa con compartimentos delgados entre un par de electrodos que serán los responsables de generar dicha diferencia de potencial. Los compartimentos estarán formados por membranas de intercambio catiónico y aniónico colocadas intercaladamente para permitir el paso de cationes y aniones, dicho intercambio provocará que algunos compartimentos se vayan quedando sin iones (diluido) y otros compartimentos irán teniendo una mayor cantidad de iones (concentrado) [39].

Asimismo, la electrodiálisis también se puede explicar como un proceso electroquímico muy utilizado en los procesos de desalinización de corrientes acuosas mediante el empleo de corrientes eléctricas. Según el “Grupo de Electroquímica Aplicada y Electrodiálisis” de la Universidad de Alicante que tienen una larga trayectoria en el desarrollo de procesos de desalinización aplicando electrodiálisis, explican que, gracias a la utilización de una variación de potencial en un apilamiento de membranas colocadas y seleccionadas convenientemente, nos facilitará la eliminación de una gran parte del material salino existente en una disolución, la cual será diluida, pasando a otra disolución a concentrar.



**Figura 4.14** Esquema del proceso de electrodiálisis. Fuente: Universidad de Alicante

Según estudios desarrolladas por el equipo de investigadores de electroquímica aplicada y electrodiálisis de la Universidad de Alicante, expresa que: “el proceso de electrodiálisis puede llegar a ser uno de los métodos más competitivos en lo que respecta a la desalación de aguas cuyas cantidades salinas sean menores de 5-6 g/L. No obstante, la electrodiálisis es la técnica con mayor potencia y eficacia en los procesos de desalinización de una corriente líquida que contengan un elemento de elevado valor añadido, pudiendo ser no iónico para determinadas condiciones de acidez” [38].

Dentro de esta alternativa, hay tres aplicaciones básicas para el empleo de la electrodiálisis convencional, las cuales se centran en la disminución de concentraciones de electrolito en una disolución, en el incremento de concentraciones de electrolito en una disolución y en la disyunción de un electrolito. Una vez dicho esto, enumeraré algunas de las diferentes aplicaciones más importantes que se le pueden dar a este proceso, dichas aplicaciones han sido recogidas por el equipo de investigación del grupo de electroquímica aplicada y electrodiálisis de la Universidad de Alicante [38]:

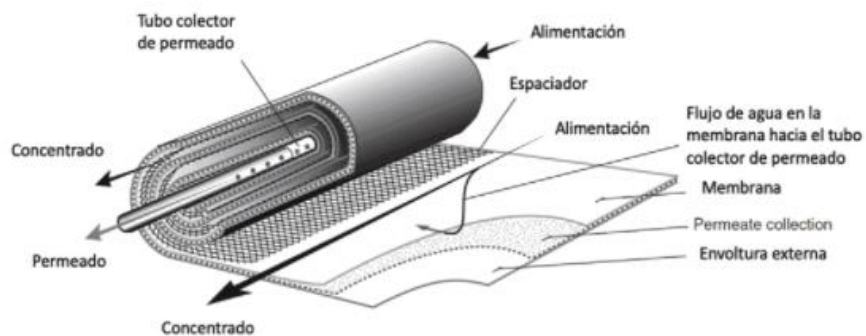
- Desalinización de aguas salobres con una concentración menor de 5.000 ppm de contenido salino inicial.
- Elaboración de sal cotidiana (NaCl).
- Desalación de sueros de quesos y leches no grasas.
- Recuperación de importantes elementos de acabados metálicos o tratamiento de sus vertidos.
- Eliminar las cenizas de melazas.
- Desalación de vertidos residuales urbanos e industriales.
- Desalación de disoluciones de aminoácidos, productos de fermentación.
- Desmineralización de plasma en la sangre.

#### **4.4. Ósmosis inversa**

La ósmosis inversa es una tecnología que, a través de la aplicación de presión, nos permite separar el solvente de una disolución concentrada. De este modo, el solvente atraviesa una membrana semipermeable, pasando de una solución concentrada a la solución diluida. Por tanto, mediante esta técnica tendremos finalmente dos flujos, en primer lugar, el solvente prácticamente puro y, por otro lado, una solución con una concentración aún mayor a la que poseía inicialmente.

Estamos hablando de una tecnología con altos niveles de eficiencia, bastante limpia y compacta, lo que nos permite obtener agua de elevada calidad provenientes de aguas salobres, e incluso de aguas marinas. Además, es considerado uno de los métodos más deseados para el tratamiento de efluentes que quieren ser reutilizados. Muchas empresas, con el objetivo de una mayor eficacia de filtrado de contaminantes del agua para facilitar su posterior uso, invierten mucho en la fabricación de membranas avanzadas tecnológicamente que les permita obtener excelentes flujos de permeado trabajando a presiones cada vez más bajas [40].

Las plantas de ósmosis inversa además de necesitar sistemas de pretratamiento, también requieren de un equipo de bombeo, de alimentación, así como de depósitos presurizados (housings), las cuales contienen a las membranas, también es recomendable instalar equipos de dosificación de químicos, entre otras tecnologías. De modo que, las membranas y demás componentes que conforman este sistema, trabajen de forma adecuada. A continuación, comentaré brevemente sobre la disposición de las membranas en una planta de ósmosis inversa. Una de las más interesantes es la que refleja John Crittenden, ingeniero civil y ambiental del Instituto tecnológico de Georgia. Según su modelo, las membranas eran fabricadas en forma de espiral, con una longitud media entre 1-1.5 m, y así como un diámetro entre 10-20 cm. El proceso que acontece es el siguiente, el agua se introduce a presión por un lateral del housing, es decir, fluyendo tangencialmente a la membrana, de modo que, parte de esta agua empujada a presión traspase la superficie de la membrana hacia el colector de permeado, en cambio, el agua que contenía altos niveles de concentración de sales, se expulsa por el otro extremo de la membrana.



**Figura 4.15** Proceso de ósmosis inversa y componentes de una membrana según el modelo de John Crittenden.



**Figura 4.16** Planta de ósmosis inversa.

Esta metodología para el tratamiento de aguas residuales, requieren de un sistema de pretratamiento, con el fin de alargar la vida útil de las membranas, lo que se traduciría a un mayor rendimiento y eficiencia en la reducción de sólidos disueltos. El sistema de pretratamiento tiene diferentes funciones o finalidades, una de ellas, es evitar las incrustaciones, las cuales se producen en la mayoría de ocasiones cuando las sales de menor solubilidad, como por ejemplo las sales de calcio o de magnesio, se quedan incrustadas en los poros de las membranas. Ante la pregunta de qué es lo que habría que hacer para prevenir la formación de estas incrustaciones en la membrana, la respuesta se basa en un control de los niveles de pH del agua, modificando de este modo la solubilidad de dichas sales. Otra solución interesante sería la aplicación de antiincrustante, mediante el cual podemos prevenir la formación de cristales o ralentizar su crecimiento.

Pero esto no es todo, la filtración es otra de las finalidades de los sistemas de pretratamiento en la ósmosis inversa, mediante la cual nos permite la eliminación de los sólidos en suspensión, debido a que pueden crear graves problemas en el sistema, tales como la saturación superficial de la membrana o la obstrucción de la alimentación. Lo recomendable según los especialistas, es que dichos filtros tengan la capacidad de retener partículas de tamaños superiores a 5  $\mu\text{m}$ .

Por último, considero de real importancia el uso de estos pretratamientos con el fin de desinfectar la membrana, evitando de este modo la saturación biológica de la misma. Por lo tanto, es muy importante cerciorarse de la compatibilidad existente entre el material de la membrana y el agente desinfectante, para prevenir algunos daños permanentes en la membrana de ósmosis inversa [41].

A continuación, comentaré las principales aplicaciones que podemos encontrar a nivel industrial con respecto a este método de tratamiento de aguas, la ósmosis inversa [42]:

- Es muy empleada dentro de la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica, química, biotecnológica, entre muchas otras, por lo que se puede comprobar su gran versatilidad y su amplio abanico de posibilidades de empleo en el sector industrial, pues en estos casos, generalmente, se emplea agua osmotizada, debido a que los procesos que se desarrollan en dichas actividades industriales requieren de un alto nivel de pureza en sus aguas.
- Otro uso muy común de esta técnica, es para potabilizar el agua, para el posterior consumo humano. En muchas regiones del planeta el agua dulce es un bien bastante escaso, por lo que deben recurrir a la utilización de la ósmosis inversa para la desalinización de las grandes masas de aguas saladas.

- Actualmente, cada vez más industrias buscan la reutilización de las aguas residuales, para poder conseguir esto se recurre a la ósmosis inversa. En la mayoría de ocasiones, los efluentes provenientes del sector industrial requieren de este tratamiento para poder ser reutilizados, y no solo para su reutilización, sino para evitar dañar el medioambiente en los casos en los que la planta industrial vierta dichas aguas residuales al medio. Este procedimiento es muy utilizado en la industria textil.

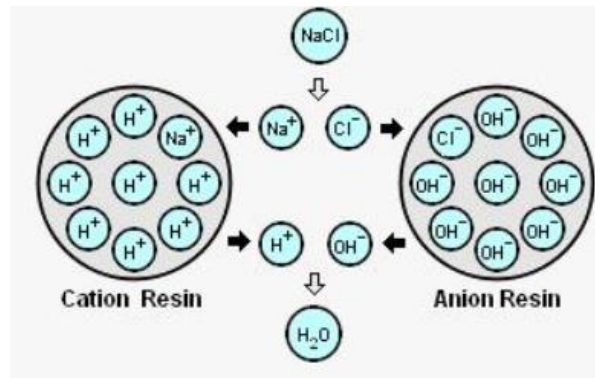
En definitiva, la ósmosis inversa presenta una amplia variedad de posibilidades con respecto a sus posibles aplicaciones en todo el mundo. Desde su uso en las plantas de procesamiento de agua embotellada, hasta su posible aplicación en las instalaciones de acabado y chapado de metal, empleando dicha tecnología en su lavado y enjuague de dichas piezas. Además de ser utilizado en los puestos de lavados de autoservicio para eliminar los minerales formadores de manchas del agua, o en las calderas de vapor, las cuales emplean la ósmosis inversa para reducir los costes energéticos y químicos, pues se reduce la frecuencia de purga. Por estas razones, el tratamiento de aguas residuales, tanto industriales como domésticas, mediante ósmosis inversa es considerado uno de los métodos más eficientes, limpios y compactos, convirtiéndose en el punto de mira de muchos equipos de investigación que buscan el mejor método para el tratamiento de aguas y la mejor solución para la acuciante contaminación hídrica actual.

#### **4.5. Intercambio iónico**

El intercambio iónico es uno de los métodos de eliminación de sólidos disueltos, tanto en aguas subterráneas como en aguas superficiales, más utilizados y conocidos que existen. Dicho tratamiento pertenece a la rama de la desmineralización, el cual nos permitirá deshacernos de especies iónicas, es decir, sales disueltas que podrían generar precipitaciones en equipos de transferencia de calor, lo cual es una gran ventaja, ya que dichas precipitaciones pueden ser las causantes de fallos y roturas por stress térmico.

Mediante este tratamiento será necesario el uso de resinas de intercambio iónico. Estas resinas son copolímeros o polímeros acrílicos granulares insolubles en agua, y éstas se caracterizan por tener la habilidad de intercambiar iones particulares por otros iones. En dicho proceso de intercambio iónico, nos encontraremos con los radicales de signo positivo, que son los ácidos, y los radicales de signo negativo, que son los básicos, de esta manera, los diferentes radicales podrán permutarse con cantidades de iones de igual signo que contenga el agua. Lo

que se busca conseguir con este proceso de intercambio iónico es que, tanto los iones negativos como los positivos contenidos en el agua debido a la disolución de sales minerales en la misma, se fijen o adhieran a los radicales de la resina de intercambio cuando pasen a través de ella, permitiendo la permutación entre los radicales ácidos y básicos que la resina contiene. Este proceso se podrá entender mucho mejor de manera gráfica mediante la siguiente ilustración:



**Figura 4.17** Proceso de intercambio iónico.

Dichas resinas sintéticas se emplean tanto para purificar y eliminar nitratos o demás componentes contenidos en el agua, como para la separación de elementos disueltos en el agua. Con respecto a la purificación del agua, una de las metas a conseguir con este tratamiento es eliminar el contenido mineral (ablandamiento), para ello, usaremos un tipo de resina que posee cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ), dicha resina intercambiará los cationes de sodio por calcio  $\text{Ca}^{2+}$  y magnesio  $\text{Mg}^{2+}$  (dureza). Conforme el agua va atravesando la resina, irá incrementando la captación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  hasta que llegará a un punto donde la resina se saturará, en estos casos, tendremos que regenerar la resina, cargándola otra vez con  $\text{Na}^+$ .

Dentro de las numerosas aplicaciones en las que se puede aplicar este tratamiento por intercambio iónico, destacaría la eliminación de dureza del agua mediante un proceso denominado “suavizador de agua”, la eliminación de carbonatos mediante el proceso de de-alcalinización, la eliminación de todos los cationes mediante el proceso de decationización, la eliminación de todos los iones mediante el proceso de desmineralización, la eliminación de nitratos y desmineralización mediante el procedimiento de “lecho mixto”, y así como la eliminación de metales.

Con respecto a las resinas de intercambio, cabe destacar los dos tipos principales, las resinas catiónicas y las resinas aniónicas. En primer lugar, las resinas catiónicas son las encargadas de captar los cationes contenidos en el agua, tales como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , entre otros elementos, de este modo, desplazará de la resina las cargas  $\text{H}^+$  o  $\text{Na}^+$ . Por otro lado, nos

encontramos con las resinas aniónicas, encargadas de captar aniones contenidos en el agua, tales como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , entre otros elementos, de este modo permitirá desplazar de la resina las cargas  $\text{OH}^-$  o  $\text{Cl}^-$ , y a su vez, también permitirá captar la sílice del agua, pues se comporta como un anión débil.

Dentro de los dos grupos principales en los que se dividen las resinas de intercambio iónico, también es importante mencionar los 2 subtipos de resinas catiónicas que podemos encontrar dentro de este sistema de tratamiento de aguas:

- **SAC** → Resina de intercambio catiónico de ácido fuerte.
- **WAC** → Resina de intercambio catiónico de ácido débil.

Y los 2 subtipos de resinas aniónicas que podemos encontrarnos dentro de este procedimiento de tratamiento de aguas mediante intercambio iónico son:

- **SBA** → Resina de intercambio aniónico base fuerte.
- **AMB** → Resina de intercambio aniónico base débil.

Por otro lado, las resinas de intercambio se caracterizan por su alta afinidad con los iones de valencia mayor, ya que, por ejemplo, la resina catiónica prefiere el ion calcio o magnesio al sodio. Como todo proceso, éste también tiene un límite en el cual la resina ya ha captado tantos cationes y aniones del agua que apenas hay espacio para introducir otros, es en ese momento cuando se procede a la regeneración, pues se dice que la resina está agotada.

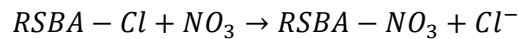
Por ello, es importante cerciorarse de cuando la resina está agotada, para evitar gastos innecesarios. Un método muy eficaz y empleado, es comprobar si se ha producido un incremento de la conductividad del agua a la salida, ya que esto es un indicio clave de que la resina se encuentra en un estado de agotamiento, pues se produce la denominada “fuga de iones”. El procedimiento de regeneración es de gran ayuda, y esencial, para mantener unos elevados valores de rendimiento, simplemente con hacer circular a través de la resina una solución concentrada de un ácido (como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{HCl}$ ) para las resinas catiónicas, o hacer pasar una solución concentrada de una base (como la sosa:  $\text{NaOH}$ ).

Por último, me gustaría destacar una de las características más interesantes del método de tratamientos de aguas mediante intercambio iónico, dicho método es un proceso reversible, puesto que seremos capaces de tratar el agua de nuevo y comenzar el proceso reiteradamente, una vez la resina haya sido regenerada. No solo eso, sino que además, el empleo del intercambio



iónico, presenta un porcentaje de desmineralización bastante elevado, reduciendo contaminantes disueltos en el agua en torno al 95-99% [44].

El sistema de tratamiento de aguas mediante intercambio iónico también tiene es de gran utilidad en la eliminación de nitratos, empleando resinas aniónicas base fuerte en ciclo cloro. A continuación, expresaré la reacción producida:



Una de las principales aplicaciones de esta técnica es para tratamientos de potabilización de aguas, y así como para el tratamiento de aguas residuales. También, cabe destacar su aplicación en la eliminación de elementos contaminantes como el ácido bórico, nitratos o perclorato en aguas potables, o incluso, la eliminación de metales pesados como el cadmio, cromo, hierro, mercurio, entre otros, a partir de residuos. Elementos como el arsénio, flúor o litio, son difíciles de eliminar mediante el uso de intercambio iónico, en vista de la escasa selectividad de las resinas [43].

Por último, incluiré a continuación, una serie de ventajas que considero de real importancia a la hora de barajar este método de tratamiento de aguas entre otros sistemas de tratamiento existentes:

- Los equipos utilizados en este tratamiento presentan una alta versatilidad, siempre y cuando se trabaje con concentraciones de sales no muy elevadas.
- Las resinas se caracterizan por sus altos valores de eliminación de sólidos disueltos en las aguas, a la vez que resultan ser bastante compactas y muy económicas.
- Las resinas presentan una muy buena estabilidad química, lo que se traduce a una larga duración del empleo de la misma, y así como una rápida regeneración.
- El tratamiento mediante intercambio iónico presenta una favorable facilidad de automatización y una buena adaptación a situaciones específicas.

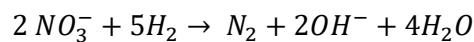
#### **4.6. Catálisis heterogénea**

En los últimos años ha surgido la necesidad de encontrar métodos de desnitrificación catalítica de nitratos en aguas, prueba de la gran importancia que está teniendo este tipo de tratamiento de aguas. Sin embargo, aún queda mucho por descubrir en este método tan sofisticado y prometedor. Aún es necesario hallar catalizadores que consigan eficazmente la conversión total de nitratos, y así como aumentar la selectividad de este método para evitar la formación de elementos intermediarios tóxicos tales como nitrito y/o amonio. Este sistema de

tratamiento de aguas está siendo analizada por diferentes ramas de la ciencia como la nanotecnología, mediante el uso de nanomateriales tales como las nanopartículas, nanotubos o nanofibras, conseguimos la adecuada remoción de nitratos [45].

Con respecto a la eliminación de nitratos mediante procesos catalíticos existen diferentes técnicas posibles bastante eficaces y de gran interés:

- En primer lugar, cabe destacar este nuevo y prometedor método de reducción catalítica de nitratos a nitrógeno y agua mediante un catalizador sólido bimetálico (formado por la conjugación de un metal noble y un metal no noble) empleando el hidrógeno como agente reductor, lo que es más interesante en dicha técnica es que conseguimos desnitrificar el agua sin generar ningún tipo de residuo que requiera ser tratado, ya que obtenemos como producto de la reacción un elemento inerte como es el nitrógeno. No obstante, esto no quita que existan posibilidades de formación de nitritos y amonio como producto intermedio y como subproducto, respectivamente. A continuación, expresaré las reacciones correspondientes a este proceso de reducción catalítica de nitratos, empleando como agente reductor el hidrógeno ( $H_2$ ), para la completa reducción del mismo:



- En segundo lugar, existe otra técnica muy utilizada en lo que respecta a la eliminación de nitratos presentes en el agua, denominada electrocatálisis, este método está enfocado en utilizar un electrodo de carbono soportado con un metal activo. Pero sí es cierto que este método no es el más eficiente, sobre todo, si lo comparamos con la técnica anteriormente mencionada. Pero es interesante los resultados que obtuvieron en el Departamento de Recursos Renovables en la Facultad de Agricultura de la Universidad de Wyoming, donde concluyeron sus investigaciones indicando que, aplicando un determinado voltaje, era posible la reducción de concentraciones de nitrato en aguas subterráneas en torno al 50%, en un intervalo de tiempo de entre 40-60 minutos [46].
- Por último, nos encontramos con una técnica bastante eficiente dentro del tratamiento de aguas residuales, denominada fotocatalisis, dicho método emplea, como agente reductor, el metanol. Mediante este método se han confirmado valores de conversión de nitrato óptimas, llegando a alcanzar valores inferiores al

5%. Lo que caracteriza a la fotocatalisis es la necesidad de perfeccionar ciertos factores que condicionan al resultado de este sistema de desnitrificación, tales como el tiempo de irradiación, la naturaleza del agente reductor, el pH de la disolución y así como la naturaleza del metal localizado sobre el catalizador [47].

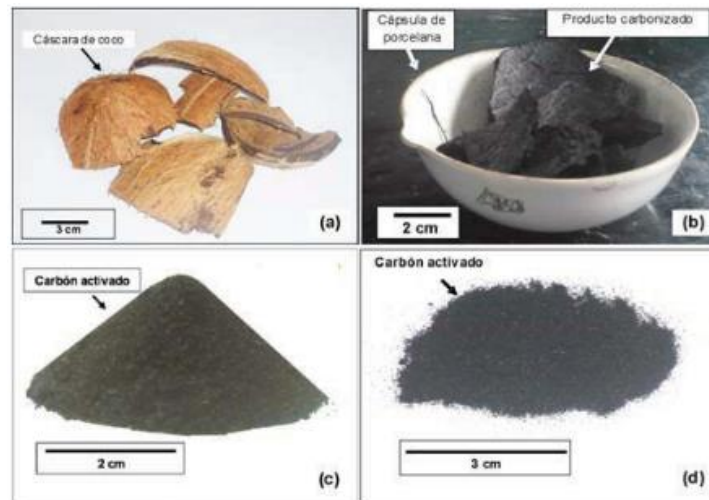
#### 4.7. Adsorción

La adsorción es uno de los métodos de eliminación de contaminantes presentes en el agua más utilizado, dicho sistema de tratamiento de aguas consiste en la adhesión de una delgada película de moléculas a la superficie de los cuerpos sólidos o líquidos que entran en contacto con dicha capa de moléculas. Las aplicaciones de este método son muy variadas, desde el tratamiento terciario de aguas residuales o la remoción de sustancias orgánicas en aguas potables, hasta su utilización en el tratamiento de aguas de acuarios o de piscinas. Mediante este sistema, podremos remover una gran variedad de sustancias o adsorbatos, desde virus, bacterias o moléculas, hasta compuestos orgánicos tales como gasolina, pesticidas o solventes.

Existen actualmente una gran variedad de medios filtrantes o materiales adsorbentes para el adecuado desarrollo de esta tecnología, entre los más importantes a destacar se encuentran, los de óxido de aluminio o el hidróxido de hierro, pero el más conocido de todos ellos es el carbón activo. Dichos materiales poseen la capacidad de captar moléculas y sustancias no deseadas gracias a la presencia de poros minúsculos en su superficie. Es debido a esto, que el carbón activo tenga tanto éxito dentro de los materiales adsorbente, pues posee un gran número de estos minúsculos poros. A día de hoy, un buen número de industrias dedicadas al tratamiento de aguas mediante procesos de adsorción emplean el carbón activo en polvo como medio adsorbente. Asimismo, este material adsorbente también posee la capacidad de purificar, decolorar y desodorizar el agua, y no solo eso, sino que además hay que añadirle su capacidad de remoción de ciertos metales pesados y compuestos orgánicos volátiles [48].

El carbón activado es posible obtenerlo a partir de desechos domésticos como podría ser la cáscara de ciertos alimentos, como por ejemplo una cáscara de coco, aquí dejo una ilustración del proceso de obtención de carbón activado a partir de este desecho natural. En la primera imagen se muestra la cáscara de coco, en la segunda imagen se muestra el producto carbonizado, a continuación, se tritura en un mortero, se tamiza y posteriormente se le somete a un proceso de activación, mezclando ciertas cantidades del material tamizado con una solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), dando como resultado el carbón activado de la imagen (c) y

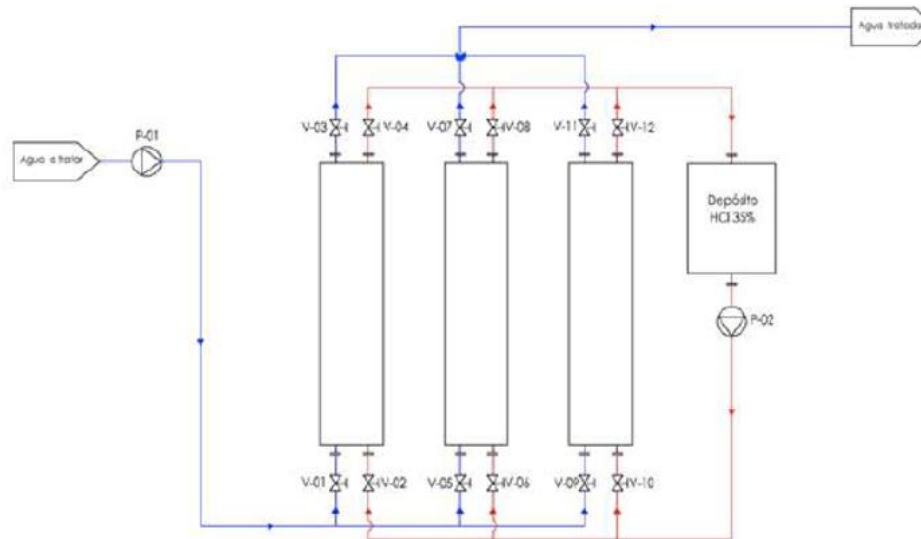
(d). Con esto, quería dar hincapié en las facilidades que existen en la fabricación de carbón activo y lo económico que supone dicho proceso.



**Figura 4.18** Proceso de obtención de carbón activado a partir de desecho doméstico

A continuación, me centraré en el proceso de eliminación de nitratos mediante quimioadsorción, dicho tratamiento de adsorción fue el que analicé durante mi pasantía de prácticas. La quimioadsorción se diferencia de la fisisorción en el proceso de formación de enlaces químicos entre las moléculas de adsorbato y los sitios activos del material adsorbente, y mediante este proceso de quimioadsorción, la sustancia adsorbida dará lugar a una especie química diferente. Esta tecnología emplea un método innovador, económico y eficiente para la remoción de nitratos tanto en aguas residuales provenientes de actividades industriales, como de aguas efluentes de aguas superficiales y subterráneas.

Para la captación de dichos contaminantes existentes en el agua a tratar, empleamos un medio adsorbente, el cual consistía en un material que se encargaba de captar nitratos de un adsorbente selectivo para  $\text{NO}_3^-$ , el cual está compuesto por especies metálicas y no metálicas en estado sólido que tienen la capacidad de fijar químicamente los iones  $\text{NO}_3^-$ , por medio de los centros activos. Previamente, dicho material adsorbente debe ser activado a través de una conjugación de tratamientos térmicos y la agregación de ciertos reactivos. Una vez activado, ya podremos trabajar con este medio adsorbente para la captación de nitratos en el agua, llevándose a cabo un proceso de quimioadsorción entre el adsorbato y el material adsorbente. Estos procesos químicos se basan en las interacciones que tienen lugar en los centros activos localizados en la superficie del material adsorbente al contacto con las moléculas contaminantes del agua, dichas interacciones se producen debido al intercambio de electrones.



**Figura 4.19** Esquema del proceso de eliminación de nitratos mediante quimioadsorción

Trabajando en este proyecto, estuve analizando diferentes características fundamentales de estos medios adsorbentes que empleábamos, una de estas propiedades que debía investigar era los límites de captación de nitratos que el material adsorbente era capaz de retener en un solo proceso de lavado, y así como cuantos lavados es capaz de soportar el medio adsorbente hasta que se sature y pierda su eficacia, es decir, su capacidad de eliminación de nitratos en el agua, momento en el cual debería ser regenerado. En cuanto al regenerante empleado, trabajamos con una disolución de HCl al 35%, permitiendo la limpieza del material adsorbente mediante la retirada de los nitratos adheridos a su superficie, quedando, por tanto, libres los centros activos. De este modo, podíamos seguir trabajando de nuevo con el medio adsorbente ya regenerado. Otra de los objetivos marcados durante nuestra experiencia en el laboratorio, era conocer la cantidad reiterativa de veces que era posible reutilizar el medio regenerante (HCl), hasta que se saturase y se agotase su capacidad regenerativa. Según nuestros análisis, tras el empleo reiterado de lavados con HCl sobre el medio adsorbente, nos dimos cuenta que, a partir del vigésimo segundo lavado aproximadamente, el HCl dejaba de tener efecto alguno sobre el medio adsorbente, y confirmábamos, por tanto, su saturación. Era en este momento cuando debíamos cambiarlo por otra nueva disolución distinta de HCl.

### **Tipos, aplicaciones y principales ventajas del carbón activo**

En definitiva, la mayoría de los sistemas de adsorción con el fin de purificar el agua contiene como mínimo una etapa desarrollada mediante carbón activado. Como hemos dicho antes este carbón activo se puede obtener de mediante desechos naturales como son las cáscaras de coco, pero también pueden provenir de otros elementos como del hueso del carbón, de la turba, del

mismo carbón o del serrín. Y su modo de activación consiste en un tratamiento térmico a temperaturas bastante elevadas, provocando un cambio en su estructura interna, disminuyendo de esta manera la magnitud de sus poros e incrementando su superficie, esto dará lugar a un carbón mucho más poroso de lo usual. El hecho de que la textura sea porosa, va a generar una carga eléctrica negativa, lo cual le habilita la atracción de moléculas cargadas positivamente, como son las toxinas, gases o demás componentes contaminantes presentes en las aguas. Por tanto, una de las mayores ventajas que se obtiene de la activación del carbón es el aumento de su área superficial a una magnitud de aproximadamente  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ . como dato curioso y muy identificativo de este incremento exponencial, es que aproximadamente 5 gramos de carbón activado tienen un área superficial igual a la de un campo de fútbol. Asimismo, este aumento del área superficial va a generar una excelente área de filtración, además de una gran capacidad de adsorción de impurezas del agua, tales como nitratos, cloros, sabores y olores, y así como un gran número de residuos industriales, solventes, pesticidas y ciertos productos químicos.

Básicamente existen dos tipos de filtrado de carbón, en primer lugar, el carbón activado granular (GAC) y, en segundo lugar, el carbón activado en polvo (PAC) [49].

El **Carbón Activo Granular** se emplea generalmente como tratamiento terciario en EDARs o incluso, como parte del proceso de filtración del tratamiento de aguas residuales. Este primer tipo de carbón activo es capaz de adsorber pequeñas cantidades de compuestos orgánicos solubles y diferentes compuestos inorgánicos tales como nitrógeno, sulfuros y metales pesados, los cuales pueden hallarse en numerosas ocasiones en las aguas residuales una vez realizado el tratamiento primario y secundario en las estaciones depuradoras de aguas residuales.

Existen una serie de factores que serán necesarios determinar y conocer para poder implantar un sistema de adsorción de carbón activo granular. Dichos factores radican en conocer la calidad y cantidad de agua residual que entra en el sistema, pues es de gran importancia calcular la concentración de sólidos en suspensión, es recomendable que no superen los  $20 \text{ mg/L}$ . Además, se debe tener en cuenta otros puntos importantes como el pH y la temperatura del agua a tratar, pues afectará no solo a la solubilidad de ésta, sino que también tendrá repercusión en las propiedades de adsorción de los contaminantes sobre el carbón activo.

A continuación, redactaré una serie de ventajas que existen con el empleo de este tipo de carbón activo, las más importantes a destacar son:

- Alta fiabilidad con respecto a la eliminación de compuestos orgánicos disueltos, en especial, en aguas residuales urbanas que posean un alto porcentaje de aguas residuales industriales.
- Requiere muy poco espacio, bastante compacto.
- Posee una gran capacidad de adaptación a cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Estos sistemas son menos exigentes que los tratamientos biológicos.



**Figura 4.20** Carbón activado granular

El **Carbón Activo en Polvo** puede ser mezclado con la biomasa durante el tratamiento secundario, lo que potencia la actividad de los microorganismos, esto favorecerá la eficiencia de la eliminación de contaminantes orgánicos a partir de la biomasa, puesto que podrán adsorber, retener y ceder oxígeno en su superficie. Este segundo tipo de carbón activo adsorbe físicamente sobre su superficie elementos tóxicos como metales pesados. Habrá que tener en cuenta ciertos aspectos importantes con este tipo de tratamiento de aguas residuales, como el ajuste y el control de los niveles de pH, el tiempo de retención del licor mezcla o el caudal de entrada, para variar de este modo la dosis empleada de carbón activo.

Este sistema empleado en el tratamiento de aguas residuales posee una amplia gama de posibilidades de utilización, dichas aplicaciones van desde la eliminación de lixiviados en vertederos o la filtración de aguas superficiales y subterráneas contaminadas, hasta su aplicación en EDARs que recogen aguas residuales urbanas e industriales.

Los beneficios más importantes a destacar en este sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el carbón activo en polvo (PAC) son las siguientes:

- Existe la posibilidad de implementar este sistema PAC, a un sistema de fangos activos, con la ventaja de que supondría un coste mínimo.

- Bajada importante de los niveles de amoniaco, mejorando por tanto los valores de nitrificación.
- Permite la desaparición del color y el olor del agua tratada.
- En casos de contaminación máxima o punta, este tratamiento es mucho más estable que el sistema biológico.
- Es uno de los métodos más favorables con respecto a la sedimentación de sólidos en aguas con un alto índice de contaminación.



**Figura 4.21** Carbón activado en polvo.



## 5. PARTE EXPERIMENTAL

Este TFG se ha realizado en los laboratorios del Centro Experimental Agroalimentario Tomás Ferro de la Universidad Politécnica de Cartagena, en La Palma (Cartagena).

### 5.1. Materiales

Los materiales empleados en el desarrollo de este TFG fueron los siguientes:

- Kitasato de 250 mL.
- Bomba de vacío, con sus correspondientes conductos conectivos.
- Embudo.
- Soporte para el correspondiente medio adsorbente.
- Medio adsorbente utilizado para los ensayos de desnitrificación.
- Vasos de ensayo de diferentes volúmenes (1000, 500 y 100 mL).
- Probetas (100 y 25 mL).
- Espátula de laboratorio.
- Jeringuillas de laboratorio para la recogida de muestras de diferentes sustancias.
- Medidor de nitratos para análisis de aguas, suelos, savia en plantas y alimentos. HORIBA LAQUAtwin NO<sub>3</sub>-11.
- Garrafas de 5L de agua destilada.
- HCl (35%).
- Gafas protectoras.
- Guantes impermeables y aislantes.



**Figura 5.1** Material de laboratorio empleado.

## 5.2. Métodos

**Tabla 5.1** Caracterización del medio adsorbente

<b>Capacidad de retención del medio adsorbente</b>	3.50 - 5.80	[g NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / kg]
<b>Densidad</b>	0.22	[kg / L]
<b>Granulometría</b>	30 - 150	[μm]

Los experimentos realizados, se centraban principalmente en dos partes. La primera etapa se centró en determinar la cantidad de nitratos que era capaz de retener el medio adsorbente, para ello, se realizó una disolución madre de NaNO<sub>3</sub> cuya concentración variaba en función de los gramos de NaNO<sub>3</sub> diluidos en 1L de agua. Para esta primera etapa, a partir de la disolución madre se realizaron disoluciones de diferente concentración, desde muestras con una concentración de solo 25 ppm, hasta muestras de 150 ppm. En total se realizaron 82 ensayos, que fueron los siguientes:

- Inicialmente se realizaron medidas de eliminación de nitratos en muestras de 25 ppm, 30 ppm, 35 ppm, y así sucesivamente, de cinco en cinco, hasta 80 ppm.
- A partir de la muestra de concentración 80 ppm, se realizaron medidas, de uno en uno, poniendo como límite la muestra de concentración 150 ppm.

También se estudió el proceso de desorción empleando el HCl (al 35%) como medio regenerante.

A lo largo de este trabajo de Fin de Grado, me centraré principalmente en la primera etapa, basada, como he dicho anteriormente, en la eliminación de nitratos mediante el uso del medio adsorbente, y así como de la comprobación del comportamiento del mismo ante disoluciones de diferente concentración y como actúa cuando se acerca a un estado de saturación.

Para ello, fue necesario obtener la disolución madre, a partir de la cual sacábamos las demás disoluciones con las que desarrollábamos estos ensayos a diferente concentración.



**Figura 5.2** Peso electrónico empleado para medir los gramos de  $\text{NaNO}_3$



**Figura 5.3** Disolución madre depositada en una botella enumerada

Por lo tanto, sabiendo que 1 g/L de disolución madre equivale a 1000 ppm, obteníamos de esta manera la concentración en partes por millón de la disolución madre. Este proceso, es lo que se denomina como “cálculo teórico” de la concentración de la disolución madre. Posteriormente a este proceso, realizábamos un “cálculo experimental” mediante el empleo del medidor de nitratos HORIBA LAQUAtwin NO<sub>3</sub>-11, recogiendo con una jeringuilla una muestra de la disolución madre, previamente agitada para la correcta homogeneización de la misma, e introduciéndola en el medidor de nitratos, obteniendo de este modo un valor de concentración en ppm muy similar al obtenido teóricamente. En caso de duda, solíamos quedarnos con el valor obtenido con el medidor de nitratos, el cual, era calibrado previamente para asegurar su correcto funcionamiento.



**Figura 5.4** Medidor de nitratos (HORIBA LAQUAtwin NO<sub>3</sub>-11)



**Figura 5.5** Proceso de medición de nitratos

A continuación, procedíamos a calcular el volumen (mL) de muestra necesario para recoger la concentración (ppm) deseada con la que se quiere trabajar, es decir, si yo deseo hacer un ensayo con una muestra de 100 ppm, sabiendo la cantidad de ppm que hay en mi disolución madre que es de 1 L, puedo saber mediante simples cálculos matemáticos, que volumen de la disolución madre debo extraer para recoger exactamente 100 ppm de muestra. Una vez extraída dicho volumen de disolución, lo hacíamos pasar por el medio adsorbente, el cual se encontraba colocado en un envase en forma de embudo, éste estaba conectado al kitasato por la parte superior, y por la salida lateral del kitasato se conectaba un conducto que unía al kitasato con la bomba de vacío.

Al poner en marcha la bomba de vacío, se introduce la disolución a través del medio adsorbente, y esperamos hasta que toda la muestra se deposite en el interior del kitasato. Una vez depositado todo el contenido de la disolución, procedemos a medir 5 muestras de esa disolución recién filtrada con el medidor de nitratos. Por tanto, relacionando la concentración en ppm que tenía la disolución madre, con la concentración en ppm de la muestra filtrada, podremos saber cuántos ppm han sido eliminados o retenidos por el medio adsorbente.

Debido a que realizábamos 5 medidas de nitratos por cada muestra filtrada, eliminábamos la medición de mayor valor y la de menor valor, con el fin de reducir el error y dar un valor más preciso de la media de nitratos eliminados en esa respectiva muestra. Este proceso se repetía constantemente hasta completar los ensayos con cada una de las concentraciones, por lo tanto, si en total fueron 82 ensayos completados, y para cada uno de ellos, se recogieron 5 muestras para su posterior medición, se documentaron un total de **410 muestras** para el completo desarrollo de este proyecto.



**Figura 5.6** Medio adsorbente unido al kitasato conectado a la bomba de vacío

Conforme se iban sucediendo los diferentes ensayos, observábamos como se iba reduciendo el porcentaje de nitratos eliminados por el medio adsorbente, es decir, poco a poco, y ensayo tras ensayo, el medio adsorbente iba acercándose a su estado de saturación. Cuando estimábamos que el porcentaje de ppm de nitratos eliminados iba a ser inferior al 20%, era cuando realizábamos el denominado **“lavado con HCl”** para regenerar el medio adsorbente, mediante el uso de 100 mL de HCl. Para la elaboración de este proceso, fue necesario el uso de las correspondientes medidas de seguridad, y así como la adecuada ventilación del laboratorio debido a los vapores que desprendía el HCl.

Una vez filtrado los 100 mL de HCl por el medio adsorbente, aplicando previamente como es obvio el estado de vacío mediante la bomba de vacío. Para esta primera parte, se utilizó una muestra regenerante diferente de HCl para cada lavado requerido, es decir, una vez utilizado esos 100 mL de HCl, éstos eran desechados, puesto que lo que nos interesaba en esta primera parte del proyecto era analizar el comportamiento del medio adsorbente y su capacidad de eliminación de nitratos. Tras este lavado con HCl, a continuación, hacíamos pasar por el medio adsorbente 150 mL de agua destilada como método de comprobación del estado del mismo, como es obvio, el agua destilada teóricamente debe tener un valor de 0 ppm de nitratos, pero al hacer pasar este volumen de agua destilada por el medio adsorbente, conseguimos arrastrar partículas de nitratos adsorbidas por el medio adsorbente. Estos lavados con 150 mL de agua destilada, se realizaban tantas veces como fueran necesarias, hasta que la muestra filtrada diera

un valor aproximadamente entre 30 – 60 ppm o menor a este intervalo, puesto que ya lo considerábamos un valor óptimo y válido para seguir realizando los correspondientes ensayos, y así poder seguir recogiendo las siguientes medidas.

En definitiva, la función del HCl en estos lavados o procesos de regeneración del medio adsorbente es deshacer los enlaces de unión entre los nitratos con el material adsorbente, producidos durante el proceso de adsorción, y posteriormente, con los lavados de agua destilada retiramos los nitratos adsorbidos o adheridos en la superficie del material adsorbente.



**Figura 5.7** Proceso de lavado con HCl con las correspondientes medidas de seguridad

A lo largo de la elaboración de esta práctica, tras varias semanas trabajando en el laboratorio, nos dimos cuenta que el proceso de “lavado con HCl” era demasiado lento, pues requería posteriormente varios lavados con agua destilada, y la velocidad de operación del medio adsorbente no es muy veloz, todo esto nos hizo plantearnos la existencia de algún otro método de regeneración del medio adsorbente, con el fin de ser más productivos y poder recoger un mayor número de muestras en un mismo intervalo de tiempo, además de evitar el uso reiterado del HCl, el cual es un producto químico de alto riesgo, por sus características altamente corrosivas y la liberación de vapores nocivos en su inhalación.

Debido a la necesidad de poner una solución a estos inconvenientes, se nos ocurrió emplear “**mini-lavados de agua destilada**”, los cuales consistían básicamente en introducir 150 mL de

agua destilada por el medio adsorbente, una vez que éste daba indicios de hallarse en estado de saturación. Es decir, si en vez de realizar un lavado con 100 mL de HCl y posteriormente entre 3 o 4 lavados con agua destilada, empleábamos simplemente alrededor de 2 “mini-lavados” de 150 mL de agua destilada, conseguíamos alargar el número de ensayos realizados entre cada lavado con HCl, trabajando, por tanto, a una mayor velocidad, aumentando nuestra productividad, y evitando el uso excesivo de este producto químico de alto riesgo. Y una vez, que tras realizar varios “mini-lavados”, los porcentajes de eliminación de nitratos dejaban de ser óptimos, entonces volvíamos a realizar un lavado con HCl. Finalmente, llegamos a la conclusión de que el agua destilada era un método eficiente de lavado del medio adsorbente, permitiéndonos alargar aún más la llegada del estado de saturación del mismo, ofreciendo unos altos valores de rendimiento del medio adsorbente y permitiendo, por tanto, la obtención de unos porcentajes óptimos de eliminación de nitratos.

La alta eficacia de este método se debe también a que estamos trabajando con pequeños volúmenes y empleando el estado de vacío, lo cual generará la presión suficiente para que el agua pueda romper los enlaces de unión de los nitratos con el material adsorbente, en cambio, en una planta industrial con mayores volúmenes, el agua no sería tan efectiva o no tendría un resultado tan bueno como el que se obtiene a pequeña escala en el laboratorio.

Este proceso de elaboración de la disolución madre, de la recogida de medidas de eliminación de nitratos (en ppm) y así como la realización de estos procesos de lavado, fueron realizados continuamente hasta completar los 82 ensayos preestablecidos a comienzos de este proyecto.

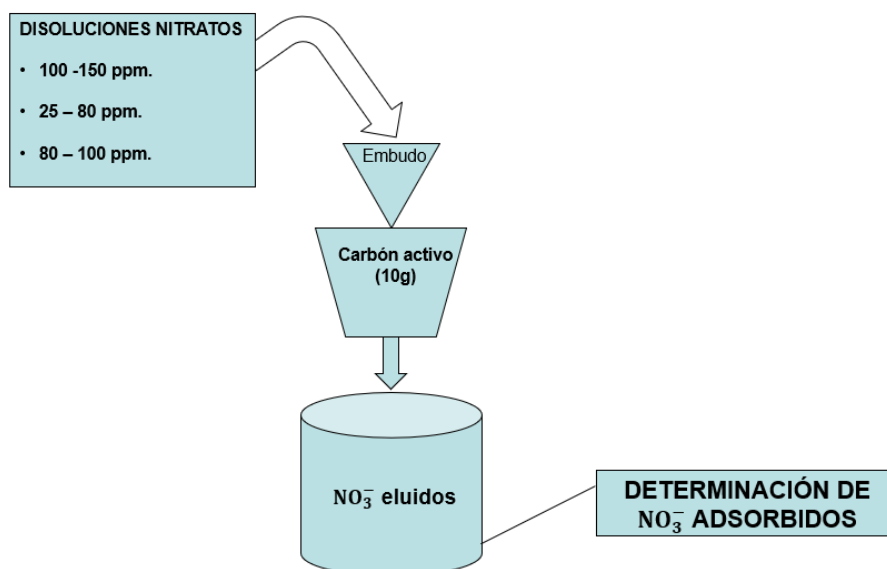


Figura 5.8 Esquema del proceso de adsorción de nitratos.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Representación e interpretación de los resultados.

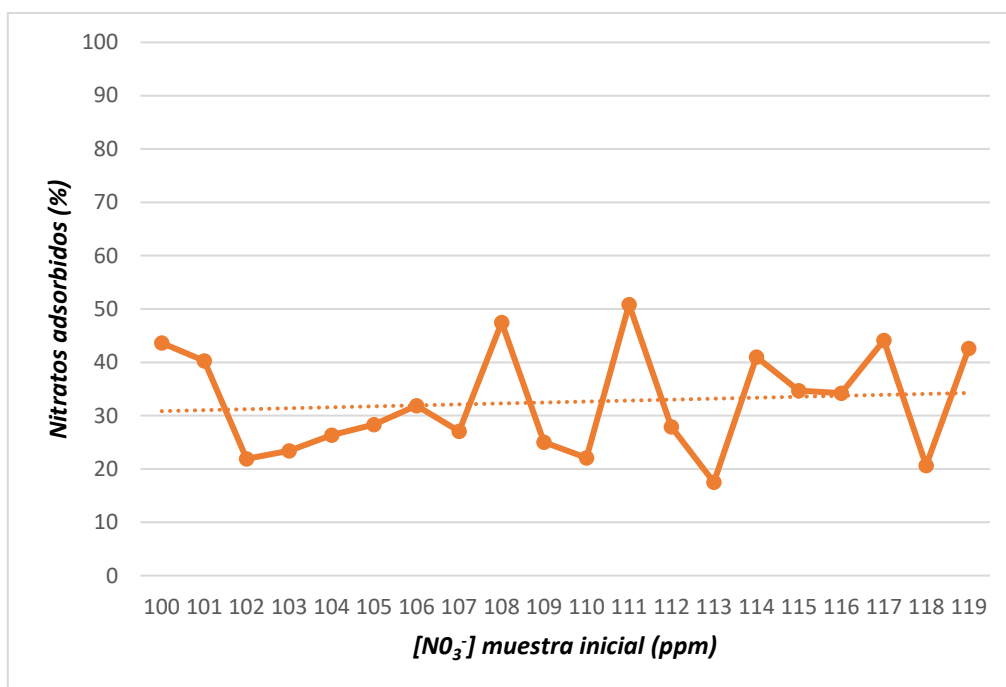
A lo largo de este apartado procederé a explicar y analizar, mediante el uso de gráficos y figuras, los diferentes datos que se recogieron en el laboratorio. Mediante dichas gráficas se analizará el comportamiento del medio adsorbente en relación a su capacidad de adsorción o eliminación de nitratos de las diferentes muestras a diferentes niveles de concentración, lo cual nos ayudará a comprobar el nivel de eficiencia de nuestro medio adsorbente con respecto al tiempo, así como la cantidad de nitratos que es capaz de adsorber en un estado de “recién lavado”, o su comportamiento tras haber realizado previamente un ensayo de adsorción, es decir, la cantidad de nitratos adsorbidos en una segunda pasada de agua a tratar, y así como su comportamiento ante una tercera tanda, y así sucesivamente.

También, considero de gran interés analizar mediante gráficas el comportamiento del medio adsorbente ante el empleo de los denominados “mini-lavados” con agua destilada, que como expliqué en apartados anteriores, lo empleábamos como un método eficaz de limpieza del medio adsorbente y como un sustituyente a corto plazo del HCl.

#### 6.1.1. Porcentaje de nitratos adsorbidos por muestra teniendo en cuenta el tiempo

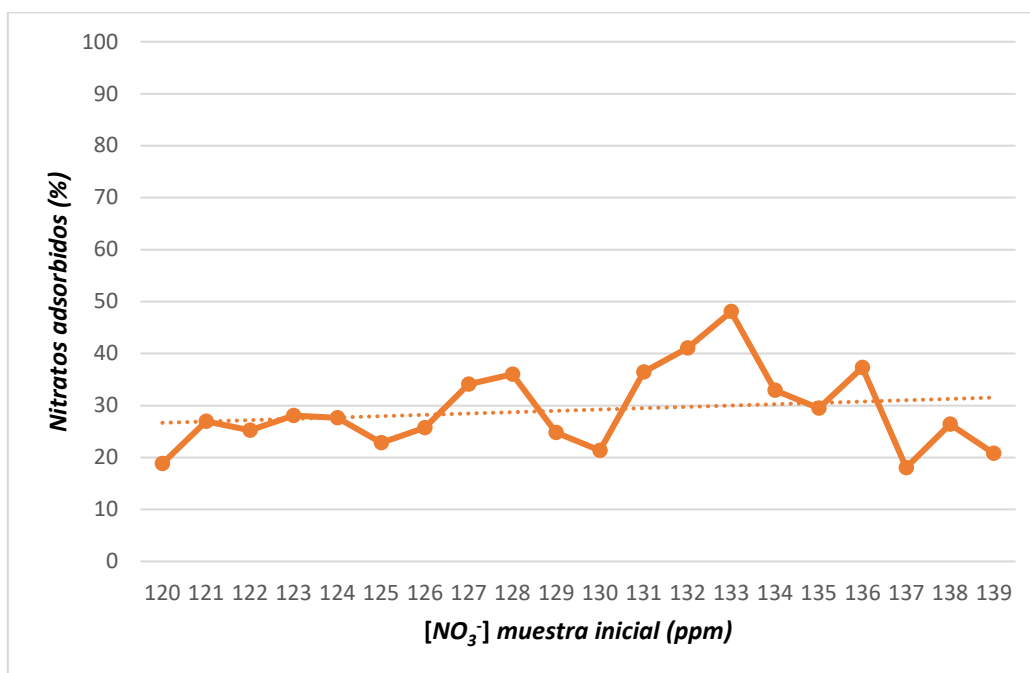
A continuación, representaré los resultados de eliminación de nitratos, obtenidos en el laboratorio durante la elaboración de este proyecto a lo largo de las semanas de trabajo realizadas, por tanto, tendré en cuenta el tiempo que lleva en funcionamiento nuestro medio adsorbente. Debo añadir que el orden de presentación de dichas gráficas, están en modo cronológico, es decir, primeramente, procedimos a realizar los primeros ensayos en muestras de 100 ppm hasta 150 ppm, y una vez completadas éstas últimas, procedimos a efectuar los ensayos con muestras de 25 ppm hasta finalizar con la muestra de 99 ppm de nitratos.





**Figura 6.1** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 100 – 119 ppm.

Como se puede observar en esta gráfica los resultados de eliminación de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente se encuentran aproximadamente entre unos porcentajes de adsorción de 50 y 20%. Se observa en las muestras de 100, 109, 117, 119 y 111 ppm unos datos bastante buenos de eliminación de nitratos, destacando la muestra de 111 ppm, en la cual obtuvimos un valor pico de 50,833% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente n°2. En cambio, obtuvimos peores valores de eliminación de nitratos en ciertas muestras, destacando la muestra de 113 ppm, con un valor de 17,5% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente n°2. Esta bajada pronunciada entre las muestras de 111 a 113 ppm, se explican debido al uso sucesivo del medio adsorbente sin aplicarle ningún proceso de lavado con HCl entre medias de esas muestras, lo mismo ocurre entre las muestras de 108 a 110 ppm, por lo que son datos coherentes y que concuerdan con lo esperado. Por último, cabe destacar como la línea de tendencia es ligeramente positiva y ascendente, mostrando valores óptimos de adsorción de nitratos y, por tanto, reflejando un excelente funcionamiento del medio adsorbente en estas primeras muestras, con una media del porcentaje de nitratos eliminados en torno al 32,55%.



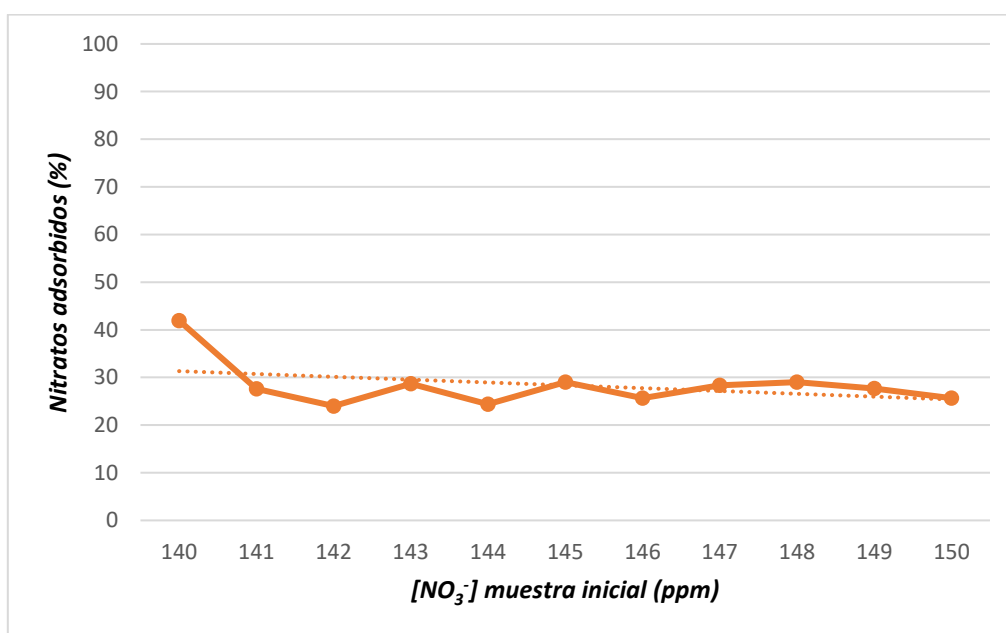
**Figura 6.2** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 120 – 139 ppm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las muestras elaboradas entre 120 y 139 ppm. Como se puede observar en esta gráfica, de igual modo que ocurría en la anterior gráfica, los porcentajes de eliminación de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente en estas muestras se encuentran aproximadamente en torno a valores entre 50 y 20%, pero esta vez, se observa un menor número de muestras con más de 40% en ppm de nitratos adsorbidos, lo cual es normal, pues el medio adsorbente irá perdiendo eficacia conforme más veces sea usado. Cabe destacar la muestra de 133 ppm, en la cual obtuvimos un valor pico de 48,06% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº2. En cambio, se obtuvo peores valores de eliminación de nitratos en otras muestras, destacando la muestra de 137 ppm, con un valor de 18,05% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº2.

Asimismo, considero importante remarcar ciertos aspectos de la gráfica, como la bajada de rendimiento del medio adsorbente no solo reflejado por una leve bajada del valor medio en el porcentaje de nitratos eliminados, siendo ahora de 29,1%, sino que además, se pueden observar cómo en ciertos tramos de la gráfica, los valores de eliminación de nitratos trazan ciertas bajadas, destacando el intervalo de valores comprendidos entre las muestra de 128 y 130 ppm, donde se realizaron lavados con HCl tras finalizar la toma de medidas en cada una de dichas muestras, y la bajada transcurrida entre las muestras de 133 y 135 ppm, donde podemos

observar una bajada más paulatina gracias al empleo de los “mini-lavados” con agua, mediante los cuales podemos seguir obteniendo buenos valores de adsorción de nitratos con el medio adsorbente pese a que vaya perdiendo eficacia con su uso.

Por otro lado, cabe mencionar el incremento de eliminación de nitratos, observándose un tramo ascendente entre las muestras de 130 a 134 ppm, esto fue debido a un cambio en el proceso de lavado llevado a cabo debido a que el medio adsorbente se encontraba bastante saturado, por lo que fue necesario aumentar el número de pasadas de agua destilada (a cuatro pasadas de 150 mL de agua destilada), para limpiar la superficie del medio adsorbente de nitratos adheridos, dando por tanto mejores resultados de eliminación de nitratos tras cada lavado, pero aumentando tanto el gasto de agua destilada como el tiempo empleado en la realización de estos procesos de lavado. Por último, cabe destacar como la línea de tendencia es ligeramente positiva y ascendente, mostrando valores óptimos de adsorción de nitratos y, por tanto, reflejando un buen funcionamiento del medio adsorbente en estas muestras posteriores a las iniciales.

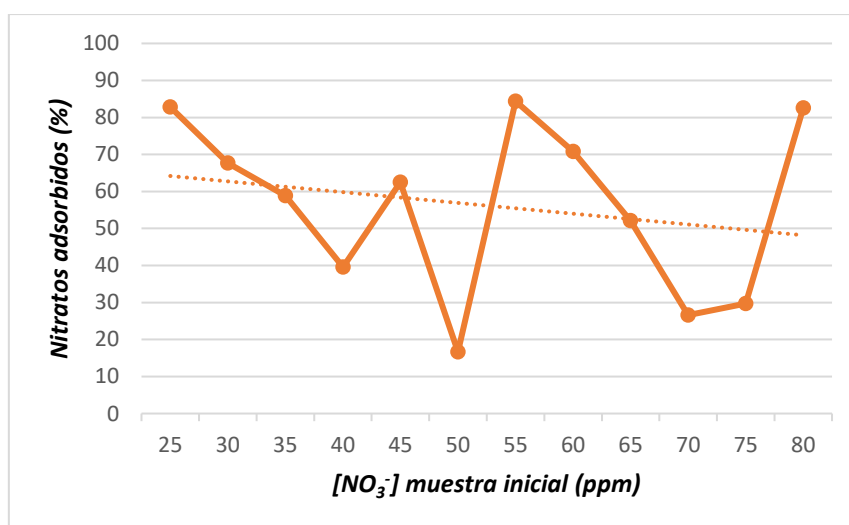


**Figura 6.3** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 140 – 150 ppm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las muestras elaboradas entre 140 y 150 ppm. Como se puede observar, los porcentajes de eliminación de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente se encuentran aproximadamente en torno a valores entre 40 y 20%, observándose un claro descenso del rendimiento del medio adsorbente, lo cual era de esperar, pues el medio adsorbente irá perdiendo eficacia conforme más veces sea empleado. Cabe

destacar la muestra de 140 ppm, en la cual obtuvimos un valor pico de 41,935% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº2. A partir de esta primera medida en este intervalo de muestras, se produjo una clara bajada de valores de eliminación de nitratos, síntoma claro de que el medio adsorbente estaba llegando a su estado de saturación, y unido también a que nos encontrábamos en el intervalo de muestras con mayor concentración de nitratos.

Analizando la gráfica, podemos observar que los resultados obtenidos son bastante similares, obteniendo una línea de valores prácticamente constante, sin muchas subidas o bajas bruscas a remarcar. Lo que sí es importante destacar es la disminución de la eficacia del medio adsorbente, lo cual se refleja no solo por una media de valores en el porcentaje de eliminación de nitratos más baja que las anteriores, en torno a 28,35%, sino que también se ve reflejado en que, por primera vez, la línea de tendencia comienza a ser levemente negativa y decreciente. Pese a esto, consideramos que el medio adsorbente adsorbió un buen porcentaje de nitratos de la muestra, y también confirmamos que no llegó a un estado total de saturación, por tanto, no pudimos saber con exactitud cuál es su límite, podría ser en unas semanas más de uso, o quizás meses o años, lo cual, es bastante esperanzador y optimista, pues muestra que el carbón activo dopado empleado presenta un buen rendimiento y una vida útil bastante larga.

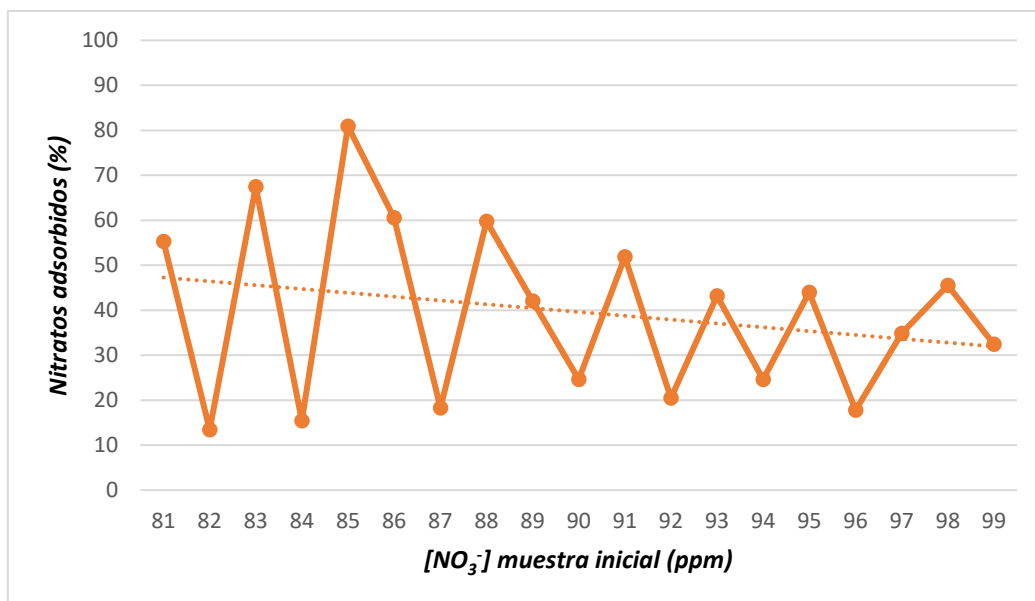


**Figura 6.4** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 25 – 80 ppm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las muestras elaboradas entre 25 y 80 ppm. Como se puede observar, los resultados de eliminación de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente oscilan bastante entre un intervalo de valores aproximadamente entre 80 y 20%. Pese a que se produce un leve descenso del rendimiento del medio adsorbente, lo cual era de esperar pues, como hemos explicado anteriormente, el medio adsorbente irá perdiendo

eficacia conforme más veces sea empleado, seguimos obteniendo varias muestras con muy altos valores de nitratos adsorbidos, debido a que estas muestras son las que menos cantidad de nitratos poseen y por tanto, al haber menos cantidad de nitratos en la muestra, mayor será el porcentaje de nitratos que el medio adsorbente será capaz de retener en su superficie. Cabe destacar los altos valores de adsorción de nitratos obtenidos en las muestras de 25, 55 y 80 ppm, remarcando principalmente la muestra de 55 ppm, donde obtuvimos un valor pico de 84,375% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº1. Por otro lado, cabe destacar la muestra 50 ppm donde se obtuvo una caída del valor de los nitratos bastante abrupta, llegando al 16,66% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº1.

Observando la gráfica, destacan dos intervalos de valores principalmente, uno comprendido entre las muestras de 25 y 40ppm, y el otro que abarca los resultados comprendidos entre los 55 y 70ppm, en dichos intervalos se produjo una importante bajada del porcentaje de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente, la causa de esto fue la realización de 4 muestras consecutivas sin realizar ningún proceso de lavado al finalizar la toma de medidas de alguna de estas muestras. He ahí la razón de ese descenso de valores en dichos intervalos, pues el medio adsorbente se irá quedando sin espacio activo disponible en su superficie, conforme vayamos haciendo ensayos sin procesos regenerativos. Por último, podemos observar que pese a los buenos resultados obtenidos con respecto al porcentaje de eliminación de nitratos en el agua a tratar, con una media de 56,18%, la línea de tendencias sigue en una tendencia de constante decrecimiento.



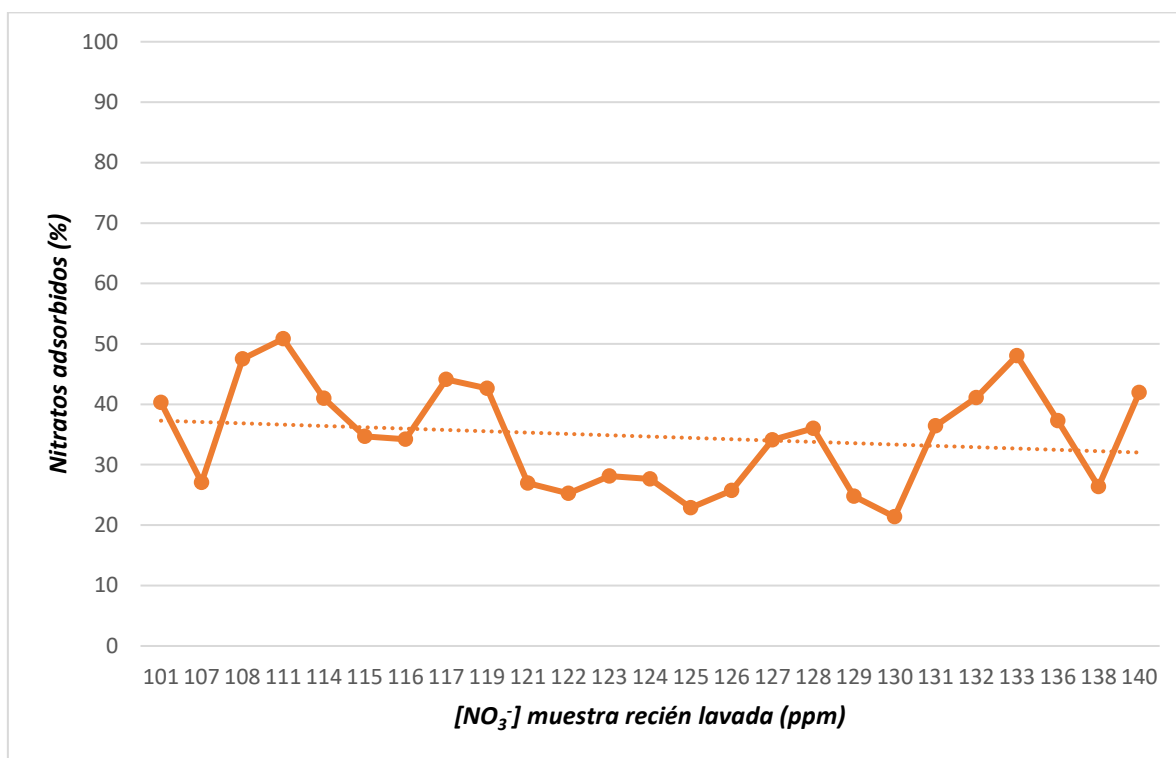
**Figura 6.5** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  en la muestra y el % retenido por el medio adsorbente para las muestras entre 81 – 99 ppm.

Para concluir, se encuentran representados los últimos resultados obtenidos comprendidos entre las muestras de 81 y 99 ppm. Como se puede observar, los porcentajes de adsorción de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente oscilan bastante entre un intervalo de valores aproximadamente entre 80 y 15%. Quizás esta sea la gráfica más dispar e irregular, pues se observan numerosas subidas y bajadas constantes, en su mayoría provocados por una sucesión de procesos de regeneración (subida) y el rápido desgaste del medio adsorbente (bajada), esta irregularidad en el comportamiento del medio adsorbente nº1, unido a su lenta velocidad de operación, fueron una de las causas principales para su futura sustitución. Considero importante destacar los altos valores de adsorción de nitratos obtenidos en la muestra de 85 ppm, donde obtuvimos un valor pico de 80,89% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº1. Por otro lado, cabe destacar la muestra 82, 84, 87 y 96 ppm, donde se obtuvieron unos porcentajes realmente bajos de adsorción de nitratos, sobresaliendo la muestra de 82 ppm, con un porcentaje de tan solo 13,41% de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº1.

Finalmente, terminaré añadiendo que a partir de la muestra 88 ppm, comenzamos a realizar los correspondientes procesos de lavado, reutilizando los mismos volúmenes de HCl ya empleados anteriormente. Esta reutilización del medio regenerante es la causante de esa bajada del porcentaje de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente, pues ya no se muestran valores picos y es más frecuente la necesidad de emplear un proceso de lavado entre muestras. Se puede observar como la línea de tendencia sigue en una bajada constante, prueba de que ya nos encontramos en la parte final de este experimento, pero pese a ello, los porcentajes de eliminación de nitratos, son bastante esperanzadores, con un valor medio de casi el 40%.

### **6.1.2. Porcentaje de nitratos adsorbidos por el medio adsorbente nº2 (recién lavado)**

A continuación, representaré los valores obtenidos de porcentaje de adsorción de nitratos en aquellas muestras que fueron medidas y realizadas, justamente después de un proceso de lavado con HCl, lo que denominamos “muestras recién lavadas”. Cabe mencionar que este análisis de muestras recién lavadas, solo lo hemos aplicado para el medio adsorbente nº2, ya que durante esta primera parte del proyecto no se empleó en gran medida el medio adsorbente nº1, pues tuvo que ser sustituido por otro. Además de que durante las pocas muestras que se emplearon con el medio adsorbente nº1, comenzamos a reutilizar el HCl, lo cual ya formaba parte de la segunda parte del proyecto global, la cual, no me toca profundizar.



**Figura 6.6** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  de las muestras recién lavadas y el % retenido por el medio adsorbente.

Mediante esta gráfica podremos analizar el comportamiento del medio adsorbente recién lavado, es decir, justo después de haber recibido un tratamiento regenerativo mediante HCl. Se pueden observar como el porcentaje de nitratos adsorbidos queda recluido en un intervalo entre 20 y 50%. Para el adecuado análisis de esta gráfica iré indicando una serie de anotaciones u observaciones que fui recogiendo a lo largo de la elaboración de dicho proyecto. En primer lugar, en las muestras de 115,116 y 117 ppm, se realizaron consecutivamente dos tandas de medidas, es decir, tras analizar la muestra de 114 ppm, se introdujo la muestra de 115 ppm a través del medio adsorbente, en las tres muestras obtuvimos valores por debajo del 20% de nitratos adsorbidos y, por lo tanto, en esas tres ocasiones se procedió a lavar el medio adsorbente con ácido clorhídrico.

Posteriormente, a partir de la muestra de 121 ppm, se produjo una anomalía extraña con respecto a la concentración de nitratos que existentes en la disolución madre, pues mediante el cálculo teórico obteníamos un valor mucho mayor de concentración de nitratos, en comparación con los valores obtenidos mediante el medidor de nitratos. Esta diferencia de resultados, provocó que las muestras tomadas a partir de esa disolución madre tuvieran valores tan bajos

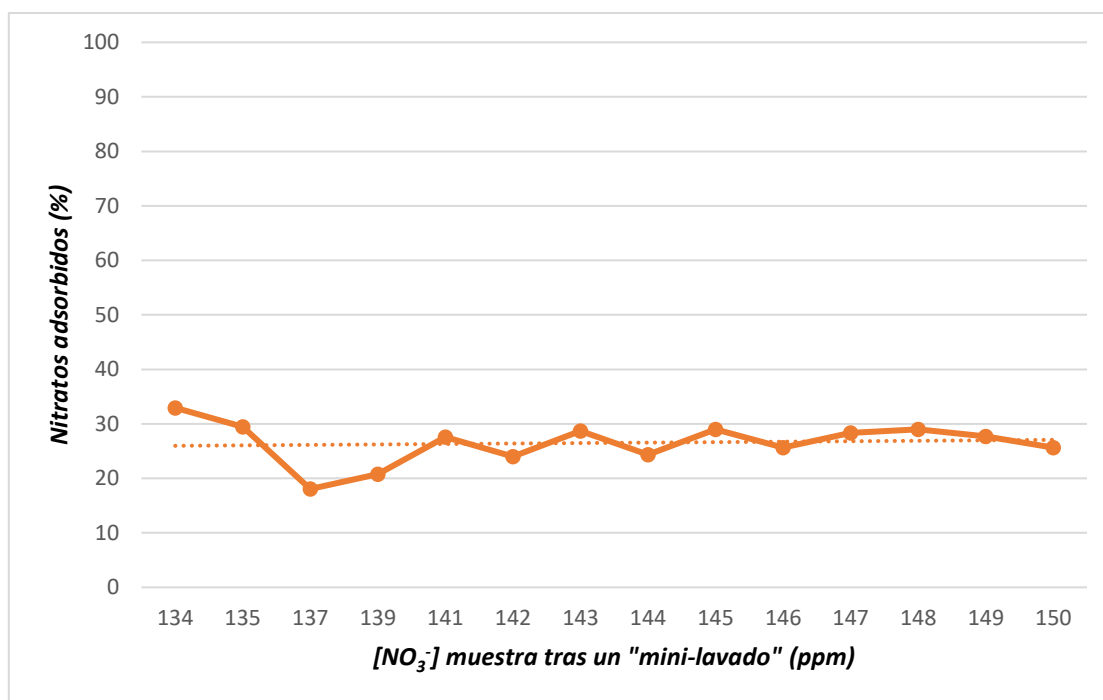
de adsorción de nitratos y que, además, fuese necesario una mayor frecuencia de lavados con HCl. Otra posible explicación de esta bajada de valores que se produjeron a partir de la muestra de 121 ppm, es la probable saturación del medio adsorbente, debido a que estábamos trabajando con aquellas muestras que presentaban mayor concentración de nitratos.

Hubo también otro suceso anómalo que quiero destacar porque nos afectó alguna vez en ciertas muestras, era que cuando dejábamos una botella de disolución madre en el laboratorio el último día de la semana, al volver a la semana siguiente, nos encontrábamos con que los valores de concentración de la disolución madre, medidos mediante el medidor de nitratos, variaba con respecto a su valor inicial de la semana anterior, dándonos valores de concentración aún más bajos, esto nos tenía bastante intrigados, pues no sabíamos muy bien si era debido a que el medidor de nitratos se encontraba un poco saturado, debido a su constante uso, durante los últimos días de trabajo de la semana, o podría ser debido a una mala agitación de la disolución madre.

### **6.1.3. Porcentaje de nitratos adsorbidos tras los “mini-lavados”**

Otro importante tema a analizar tiene que ver con los “mini-lavados”, procesos mediante el cual, conseguíamos evitar utilizar excesivamente el ácido clorhídrico, además de ser un método de lavado bastante eficaz, sobre todo a nivel de laboratorio, ya que gracias al estado de vacío que provocábamos en estos ensayos, el agua ejercía cierta presión sobre la superficie del material adsorbente, facilitando así la retirada de dichos nitratos adheridos a su superficie. Este método de lavado se nos ocurrió a nosotros de forma improvisada, con el fin de documentar como se comportaría el material adsorbente frente a estos “mini-lavados” de 150 mL de agua destilada, el tutor de prácticas nos dio el visto bueno y procedimos a emplearlo en más ocasiones, obteniendo valores bastante prometedores y constantes, como se muestra a continuación:





**Figura 6.7** Relación entre la concentración inicial de  $NO_3^-$  de las muestras tras un "mini-lavado" y el % retenido por el medio adsorbente.

Como había escrito anteriormente, los valores recogidos tras realizar los denominados "mini-lavados" son bastante estables, con valores, en su mayoría, entre los 20 y 30% de nitratos adsorbidos, lo que nos informa de que el agua no consigue regenerar al medio adsorbente como lo hace el HCl, sino que es más como un método de limpieza, mediante el cual, el medio adsorbente mejora su resistencia a la saturación, y así como conseguir mejorar la eficiencia del medio adsorbente, pues vamos retirando nitratos de su superficie y dejamos espacios activos disponibles en el carbón activo para las siguientes muestras.

Los "mini-lavados" fueron desarrollados durante la primera parte del proyecto global, pues para la segunda parte era necesario hacer lavados constantes con un mismo volumen de HCl para comprobar su límite de regeneración del medio adsorbente. Es cierto, que realizamos unos pocos más "mini-lavados" con agua destilada, pero no están recogidos en esta gráfica porque fueron realizados para el medio adsorbente nº1, y no había muestras suficientes para un adecuado y completo análisis.

## 6.2. Problemas y observaciones del desarrollo experimental

A lo largo del desarrollo de la parte experimental de este proyecto, se nos fueron presentando ciertas problemáticas y dificultades que tuvimos que ir solventando, con el fin de conseguir realizar adecuadamente todos los ensayos previstos. A todo esto, hay que añadir también los errores de carácter humano, como puede ser la imprecisión en la medida de alguna magnitud o un posible error de cálculos debido a la gran cantidad de ensayos realizados por cada día. Por ello, a continuación, redactaré una serie de problemas u observaciones que fueron surgiendo a lo largo de esta práctica en el laboratorio.

### 6.2.1. Problemática con el medidor de nitratos

Durante el desarrollo experimental de esta práctica, el medidor de nitratos fue un instrumento fundamental que nos garantizó la obtención de la concentración, en ppm, de nitratos existentes en las muestras elaboradas en el laboratorio, dentro de los principales problemas o anomalías que presenciamos con respecto a este instrumento de medida, cabe destacar los siguientes:

- En ocasiones, a la hora de calcular la concentración de la disolución madre, a partir de la cual, extraíamos las demás muestras para su posterior análisis, ocurría el siguiente problema. Hay 2 métodos de calcular la concentración de la disolución madre, mediante el cálculo teórico, el cual consistía en una serie de cálculos estequiométrico mediante los cuales obteníamos los ppm de nitratos disueltos en la solución, y por otro lado se encontraba el cálculo experimental, una vez elaborada la disolución madre se procedía a medir su concentración mediante el medidor de nitratos. Lo normal es que con ambos métodos obtengamos valores de concentración bastante similares. Pero, he aquí el problema, en ocasiones estas medidas no eran muy parecidas y al final optábamos por seguir el resultado obtenido por el medidor de nitratos. Esta disparidad en las medidas se podría deber a una mala agitación de la disolución madre, la cual debería realizarse para asegurar la adecuada homogeneización de la misma, o debido a una posible mala praxis en el llenado del vaso de precipitado con 1L de agua, quedando la disolución con más volumen de agua que el debido, o podría deberse simplemente a una descalibración del medidor de nitratos, a causa de su uso reiterado.
- Otra de las observaciones que considero importante mencionar, es la falta de precisión que mostraba el medidor de nitratos cuando la muestra tenía valores de concentración

superiores a 1000 ppm, por lo que en los casos en los que la disolución madre poseía una concentración superior a ésta, el medidor de nitratos comienza a dar valores en intervalos de 100 en 100, ofreciéndonos por tanto una medida bastante imprecisa. Para subsanar este problema, realizábamos 3 medidas y nos quedábamos con la media de estas tres medidas.

- En algunas ocasiones, sobre todo en las últimas horas de trabajo de ciertos días, tras haber realizado numerosos ensayos y, lo que es lo mismo, un gran número de medidas de concentración de nitratos mediante el medidor, nos cercioramos de que el medidor era cada vez menos preciso pues cuando le echábamos agua destilada para lavar su sensor, en ocasiones, el medidor no mostraba en pantalla 0 ppm, valor normal para el agua destilada. Cuando ocurría esto, procedíamos a calibrar el medidor de nitratos mediante los líquidos calibradores, una solución estándar de 500 y 2000 ppm.

### **6.2.2. Problemática con el medio adsorbente**

Para el desarrollo de este proyecto, en el laboratorio disponíamos de dos medios adsorbentes. Como es obvio, el medio adsorbente es uno de los elementos imprescindibles para la obtención de resultados y determinadas conclusiones que se buscaban analizar en este proyecto. De estos dos medios adsorbentes, el que denominamos como nº2, fue el que más empleamos debido a su mayor velocidad de adsorción y por su gran rendimiento en la adsorción de nitratos de las muestras. A continuación, enunciaré una serie de problemas o inconvenientes que he experimentado con respecto a los medios adsorbentes durante mi trabajo en el laboratorio:

- En primer lugar, como he dicho anteriormente, con el medio adsorbente nº2 se realizaron la mayoría de los ensayos de eliminación de nitratos en comparación con el medio adsorbente nº1, pues éste último nos dio varios problemas, pues su proceso de adsorción era demasiado sosegado pese a encontrarse en un estado de vacío, y a pesar de llevar pocos usos, comenzaba a presentar valores de eliminación de nitratos bastante bajos de los que teóricamente debería eliminar. Cuando observamos que el medio adsorbente nº1 no mejoraba, se lo entregamos a la empresa Useful Wastes S.L., la cual nos entregó otro medio adsorbente en mejor estado y listo para su empleo.
- Conforme más concentración (ppm) de nitratos tuviera disueltos la disolución madre, unido a que el volumen de medio adsorbente empleado para cada ensayo permanecía

constante (10 g), esto provocaba que el medio adsorbente pudiera llegar a su estado de saturación más rápido. Una manera de ver este estado de saturación era mediante la frecuencia de lavados con HCl, pues cuando el medio adsorbente comenzaba a quitar valores cercanos o menores a 20 ppm, ya era un indicio de que estaba saturado y de que en el próximo ensayo no iba a eliminar prácticamente un porcentaje óptimo de nitratos en la muestra, y de que era necesario aplicarle un lavado con HCl. Entre los ensayos de 120 a 132 ppm, fue necesaria una elevada frecuencia de lavado, síntoma de que nos encontrábamos en los ensayos de mayor concentración de nitratos y de que, por tanto, menos duraba el medio adsorbente en llegar a su estado de saturación.

- Otro posible inconveniente con respecto a los medios adsorbentes, era el error humano, es decir, nosotros en alguna ocasión introdujimos la disolución por el embudo del recipiente del medio adsorbente a demasiada velocidad, por lo que provocó su desbordamiento y, por lo tanto, que se derramase por fuera del recipiente parte de la muestra con partículas del medio adsorbente, observándose un líquido semioscuro que brotaba del recipiente del medio adsorbente. Para evitar este problema, básicamente tuvimos que procurar realizar dicha introducción de las muestras en el interior del embudo a una velocidad moderada y controlada, puesto que en los casos en los que se produjo este problema, las medidas de eliminación de nitratos fueron bastante negativas, recogiendo valores de eliminación de nitratos por debajo de 5-10% de los nitratos totales de la muestra.
- En el intervalo de medidas entre 130 y 150 ppm se incrementaron el número de pasadas necesarias de agua destilada, llegando a ser necesarias 4 pasadas de 150 mL de agua destilada para poder obtener unos valores de concentración de nitratos lo suficientemente óptimos para continuar con los siguientes ensayos. Esto alargó bastante la duración del proceso de lavado, y nuestra suposición sobre esto fue que el medio adsorbente estaba llegando a su límite de adsorción. Debido a esto, y con el fin de aumentar la velocidad de producción, se nos ocurrió realizar los denominados “mini-lavados” con agua destilada (150 mL), en vez de usar el HCl. La idea fue un éxito, y obtuvimos muy buenos resultados de eliminación de nitratos, ya que al encontrarse este proceso de desnitrificación en estado de vacío, el agua que introducíamos por el medio adsorbente ejercía cierta presión sobre los enlaces de unión entre los nitratos adheridos y el medio adsorbente, deshaciéndolos y retirando los nitratos de la superficie del medio adsorbente.

### 6.2.3. Problemática con el uso de HCl

El HCl es otro pilar fundamental en el desarrollo de este proyecto, puesto que actuaba como medio regenerante para nuestro medio adsorbente (carbón activado). Mediante dichos procesos de lavado, conseguíamos regenerar el medio adsorbente, lo cual garantizaba una mejora del rendimiento, permitiéndonos completar todos los ensayos preestablecidos. Pero el HCl también presentaba una serie de problemas con los que tuvimos que lidiar para la correcta realización de este proyecto de desnitrificación:

- El HCl es un producto químico altamente corrosivo, lo que la hace una sustancia bastante peligrosa. Por ello, antes de aprender a manipular el HCl, nos instruyeron una serie de medidas de seguridad a seguir, con el fin de poder trabajar con dicha sustancia con total seguridad y de evitar cualquier percance o accidente durante el empleo de dicho líquido corrosivo. Dichas medidas de seguridad se basaban en lo siguiente, el empleo de accesorios de protección durante la manipulación de este producto, tales como guantes impermeables y aislantes, gafas protectoras de laboratorio, mascarilla para reducir al máximo su inhalación, bata de laboratorio para impedir cualquier derrame sobre nuestra vestimenta, además de la apertura de ventanas para favorecer una adecuada ventilación, y así como la correcta postura y seriedad necesaria para evitar cualquier imprevisto. El ácido clorhídrico puede generar graves problemas o efectos negativos en nuestro organismo a través de tres vías diferentes, mediante inhalación, lo cual provocaría una gran irritación de los ojos, fosas nasales, garganta y bronquios, o en los casos más graves incluso rinitis hemorrágicas e importantes quemaduras químicas. Otra vía puede ser mediante el contacto, pudiendo provocar quemaduras en ojos y piel, las cuales generan un gran escozor y dolor. Por último, aunque es la menos improbable debido al uso constante de la mascarilla, es por medio de la ingestión, en casos de ingesta, puede provocar una gran irritación del tubo digestivo, llegando a crear graves quemaduras químicas en la boca, garganta, esófago y estómago, y así como un fuerte dolor torácico y una mayor dificultad para tragar [50].



**Figura 6.8** Manipulación del HCl siguiendo las correspondientes medidas de seguridad

- Otro grave problema del HCl, es su potente carácter corrosivo. Un día que llegamos al laboratorio, nos encontramos con que la bomba de vacío había sufrido una deformación en la pieza de plástico (entrada de aspiración), a la cual se le conecta un tubo de plástico que sirve de conexión entre la bomba de vacío y el kitasato. Dicha pieza estaba totalmente corroída debido al contacto de la misma con pequeñas cantidades residuales o vapores de HCl retenidos en el tubo de conexión durante todos los procesos de lavado realizados con anterioridad. El conducto de plástico también sufrió daños, quedándose restos de plástico de la pieza de la bomba de vacío en su interior, por lo que tuvimos que reemplazar tanto el conducto de conexión, como la pieza dañada de la bomba de vacío. A partir de ese día, cuando terminamos los ensayos y comenzamos a lavar los materiales empleados durante ese día, lavamos con detenimiento el conducto y lo dejamos separado de la bomba de vacío para evitar repetir dichos incidentes.



**Figura 6.9** Porción dañada del conducto de conexión



**Figura 6.10** Pieza dañada de la bomba de vacío debido a la corrosión por HCl

### 6.3. Diseño de un sistema en continuo para el tratamiento por bioadsorción de aguas con exceso de nitratos

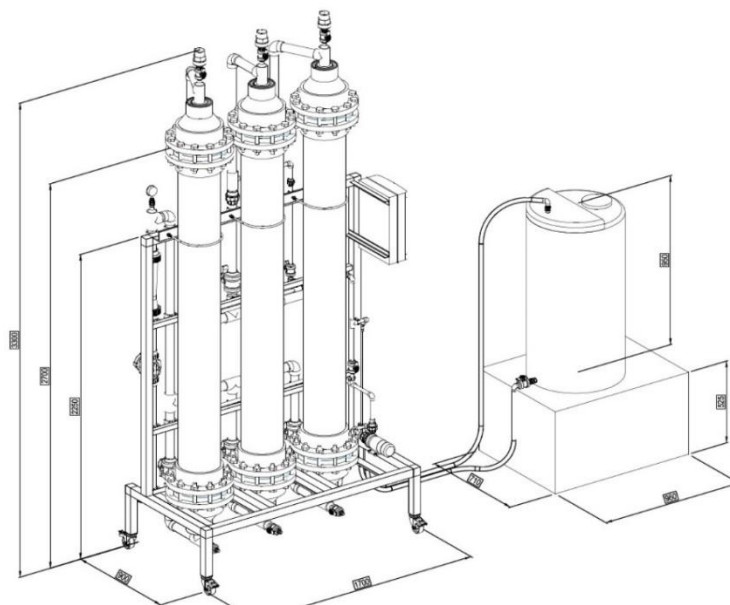
A la hora de trabajar a nivel industrial en la planta de Tomás Ferro, surgieron una serie de impedimentos que no impidió trabajar con dicho equipo de tratamiento de aguas. Hubo severos problemas con cierto material incrustante en las paredes de las columnas verticales con crepinas en la planta piloto de adsorción de nitratos de Tomás Ferro, con la que íbamos a trabajar, así como cierto deterioro de algunos materiales por el contacto directo durante largo tiempo con el ácido clorhídrico. Por lo que, aún no se ha podido comprobar su funcionamiento.

#### PLANTA DE ADSORCIÓN DE NITRATOS DE TOMÁS FERRO

Consta de 3 columnas verticales con crepinas interiores. Además de un sistema de válvulas, ciertos elementos de fontanería y un depósito para el HCl, así como una bomba de impulsión de agua y otra bomba de impulsión de ácido. Por otra parte, constaba de dos tanques de entrada y de salida de 1 m<sup>3</sup>.

El coste para los depósitos de entrada y salida y el sistema de válvulas adicional fue de **1.230,00 € + IVA**.

El coste del equipo comprendido por el bastidor, manómetros, columnas, crepinas, bombas, entre otros elementos que conforman el sistema fue de **15.900,00 € + IVA**.



**Figura 6.11** Planta de tratamiento de aguas de Tomás Ferro (100 m<sup>3</sup>/día).

**COMPOSICIÓN, DISEÑO Y COMPONENTES DE PLANTA PILOTO (100 m<sup>3</sup> agua a tratar/día).**

Los componentes principales que conforman el sistema de filtración de la planta piloto instalada en el Centro Experimental de Tomás Ferro son los siguientes:

**- Columnas de filtración**

- Unidades: 3 Columnas de filtración de tipo vertical.
- Caudal operativo de 6 m<sup>3</sup>/h.
- Tipo de flujo: ascendente a contracorriente, es decir, entrada del fluido por la parte inferior y salida del mismo por la parte superior.
- Diámetro de las columnas: 250 mm.
- Altura parte cilíndrica: 1.900 mm.
- Altura de las columnas: 2.100 mm.
- Altura total desde el suelo a zona más alta de las columnas: 3.300 mm.
- Altura desde el suelo a boca de llenado de las columnas: 2.700 mm.
- Presión máxima trabajo: 6 bar.
- Ranura de paso: 100 µm.
- Superficie de filtración: 0,045 m<sup>2</sup>/ud.
- Brazos filtrantes: Acero inoxidable.
- Nº Unidades de brazos filtrantes: 6.
- Material del cuerpo: PVC.

**- Bastidor y piso**

- Bastidor principal: donde se instalan todos los equipos.
- Material del bastidor: Acero AISI 304 (calculado para soportar todos los equipos a plena carga).
- Sistema motriz de ruedas para facilitar su transporte.
- Altura del bastidor: 2.250 mm.
- Ancho del bastidor: 1.700 mm.
- Longitud del bastidor: 900 mm.



- **Depósito dosificador de fluido regenerante**
  - Unidades: 1 depósito dosificador.
  - Capacidad: 250 L.
  - Altura del depósito: 950 mm.
  - Disposición de un cubeto de retención de ácidos.
  - Capacidad del cubeto de retención de ácidos: 300n L.
  - Dimensiones del cubeto de retención de ácidos: 960 x 710 x 525 mm.
  - Material: Polietileno.
  - Interruptor de nivel.
  
- **Bomba de regeneración**
  - Unidades: 1 bomba de regeneración.
  - Bomba de tipo magnética.
  - Ácido clorhídrico al 35% como fluido de transporte.
  - Caudal: 0 – 2 m<sup>3</sup>/h.
  - Presión: 0,4 bar.
  - Alimentación eléctrica: 220 V, 50 Hz.
  - Material del cuerpo y del cabezal de la bomba: PP.
  
- **Instrumentación**
  - MANÓMETROS:
    - Unidades: 2 manómetros (modelo: 213.53.63).
    - Fabricante: Wika.
    - Diámetro del manómetro: 63 mm.
    - Colocación de los manómetros: 1 en la entrada a la filtración y 1 en la salida de la filtración.
    - Caja conformada por un material inoxidable y rosca de latón.
    - Líquido relleno: Glicerina.
  - CAUDALÍMETROS:
    - Unidades: 2 caudalímetros de área variable.
    - Fabricante: +GF+.
    - Colocación de los caudalímetros: 1 en la línea de alimentación y 1 en la línea de regeneración.
    - Material del tubo: PVC.
    - Material del flotador: PVDF.

- **Sistema de válvulas**

- Unidades: 16 válvulas empleadas en aquellas conducciones cuya presión sea de 10 bar.
- Material de las válvulas: C-PVC.
- Material de los conductos: PVC PN.
- Fabricante: Fip.
- Presión nominal: PN16.
- Juntas y membranas: EPDM.

- **Tuberías**

- Materia de las tuberías: PVC.
- Presión nominal: PN10.

- **Control eléctrico**

- Montaje del sistema de control: interior de caja de plástico IDE.
- Completo sistema de conexión para los diferentes elementos que componen el sistema de adsorción, y así como la conexión entre éstos y el cuadro de control.
- Alimentación eléctrica: Trifásica (400 V y 50 Hz).

*PLANTA AUTOMATIZADA DE ADSORCIÓN DE NITRATOS*

Planta instalada en Torre Pacheco, la cual, a pesar de trabajar un menor caudal de agua, posee una mayor tecnología. Consta de un autómata que controla la apertura y el cierre de las válvulas del agua y del ácido para poder realizar una regeneración automática. A su vez, cuenta también con una pantalla LCD.

Dependiendo de las necesidades del cliente, el sistema trabajará con más o menos volumen de agua, en el caso de esta planta, se requería menos caudal a tratar, por lo que se puso solo un filtro con un mayor diámetro para permitir que el medio filtrante se expanda y no haya pérdidas del medio. Consta de un filtro con crepinas interiores, además de un sistema de válvulas, de fontanería y un depósito para el ácido, así como una bomba de impulsión de agua y otra bomba de impulsión para el ácido. Finalmente, también posee dos tanques de entrada y otro de salida de 3 m<sup>3</sup>. El coste total del equipo fue de **17.980,00 € + IVA**.

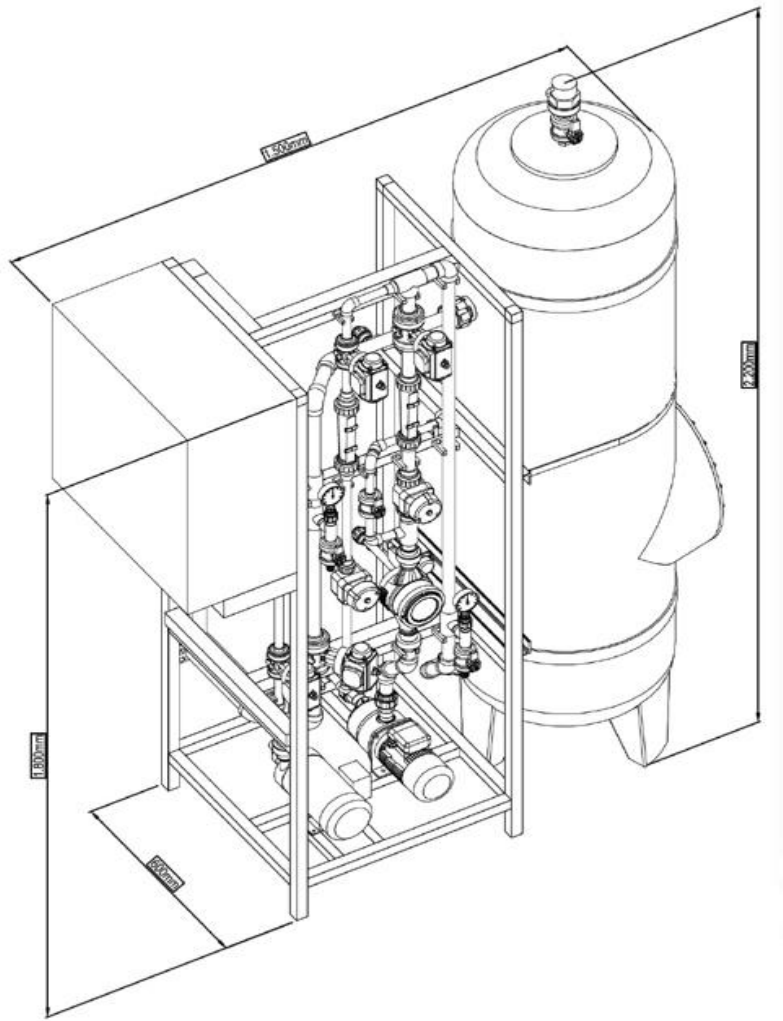


Figura 6.12 Planta automatizada de adsorción de nitratos.

## 7. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos con los ensayos realizados, se puede concluir lo siguiente:

1. Gracias a los diferentes ensayos realizados en el laboratorio he podido confirmar que el adsorbente utilizado resulta adecuado para la retención de nitratos en disoluciones en el rango de 25 a 150 mg / L.
2. Este proceso de desnitrificación mediante el uso de un medio adsorbente es un proceso barato y rentable, pues, además de ser rápido, permite la utilización reiterada del adsorbente hasta más de 80 ciclos de trabajo, siempre que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en la muestra a tratar esté por debajo de 150 mg / L. Gracias a estos análisis en el laboratorio, podemos obtener una útil información de su rentabilidad y rendimiento para ponerlo en práctica a nivel industrial.
3. Por medio de los resultados obtenidos, se comprueba que mediante la reutilización del medio adsorbente empleado (carbón activado dopado), se pueden alcanzar óptimos valores de retención de nitratos, con una media de nitratos adsorbidos del 40% en el total de muestras realizadas.
4. Se hace necesaria la desorción de los nitratos retenidos, para ello es necesario el empleo de HCl como medio regenerante.
5. El proceso propuesto posibilita el uso de la técnica de bioadsorción para la reducción de nitratos en aguas de uso agrícola.

Se puede confirmar que es un proceso bastante modulable para poder adaptarse a cualquier problema de contaminación hídrica, pudiendo ser instalado en diferentes zonas dependiendo del tratamiento de aguas que sea necesario en cada caso y del nivel de contaminación de dichas aguas, pudiendo aumentar la cantidad de medio adsorbente a emplear en la instalación.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Frank Rijsberman, director general del Instituto Internacional de Ordenación de los Recursos Hídricos (2003). Can development of water resources reduce poverty? *Water Policy*, 5 (5-6), 399-412.  
<file:///C:/Users/alfon/Downloads/2003waterandpovertypaper.pdf>
- [2] Vital Water Graphics (2002). *UNEP, Vital Water Graphics World Resources 2000-01, People and Ecosystems*.  
[file:///C:/Users/alfon/Downloads/Vital\\_water\\_graphics.pdf](file:///C:/Users/alfon/Downloads/Vital_water_graphics.pdf)
- [3] Sandra Postel, directora del Proyecto sobre Política Mundial de Aguas (2006). Conservando los ecosistemas de agua dulce. <https://www.fuhem.es/wp-content/uploads/2019/08/POSTEL-Sandra-Conservando-los-ecosistemas-de-agua-dulce.pdf>
- [4] Probelte. *Contaminación de las aguas por nitratos: problemas y tratamientos*. <https://www.probelte.es/noticia/es/contaminacion-del-agua-por-nitratos-problemas-y-tratamientos/28>
- [5] Contaminantes naturales del agua, una amenaza silente (2019). *We are water Foundation*. [https://www.wearewater.org/es/contaminantes-naturales-del-agua-una-amenaza-silente\\_320991](https://www.wearewater.org/es/contaminantes-naturales-del-agua-una-amenaza-silente_320991)
- [6] Contaminación antropogénica: definición, origen, causas y efectos (2021). *Decología.info/ Medio Ambiente*. <https://decolegia.info/medio-ambiente/contaminacion-antropogenica>
- [7] María Martínez Menchón (2007). Las ramblas del campo de Cartagena. Problemática ambiental de la laguna del Mar Menor. *Revista Murciana de Antropología*, Nº14, pp 63-76.  
<https://revistas.um.es/rmu/article/view/107671/102301>
- [8] J. Halwani, BO Baroudi, M. Wartel (1999). Contaminación por nitratos de las aguas subterráneas de la llanura de Akkar, norte del Líbano. *Artículo de la Biblioteca Nacional de Medicina del Centro Nacional de Información Biotecnológica*.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10623868/>

- [9] Obeidat, M. M., Ahmad, F. Y., Hamouri, N.A., Massadeh, A. M., & Athamneh, F. S. (2008). Evaluación de la contaminación por nitratos de manantiales cársticos, Bani Kanana, Jordania septentrional. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (3), 426-437.  
<https://www.redalyc.org/pdf/572/57225305.pdf>
- [10] Vitoria Miñana I, Brines Solanes J, Morales Suárez-Varela M, Llopis González A. (1991). Nitratos en las aguas de consumo público de la comunidad valenciana. Riesgo indirecto de metahoglobinemia en el lactante. *An Esp Pediatr*, 34(1), 43-50.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2018257/>
- [11] Antonio Delgado y Ana Tudela (2019). Mar Menor: historia profunda de un desastre. *Reportaje especial de DATADISTA para eldiario.es*.  
[https://especiales.eldiario.es/desastre\\_mar\\_menor/](https://especiales.eldiario.es/desastre_mar_menor/)
- [12] Fernanda Miranda Zoppas (2018). Purificación de agua: Eliminación de nitratos, nitritos y compuestos orgánicos utilizando catalizadores en polvo y estructurados. *Universidad Nacional Litoral. Ciencia y tecnología de materiales*.  
[https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/79567/CONICET\\_Digital\\_Nro.e6d0cc64-c4b8-4928-b4ea-97dd45b3114b\\_A.pdf?isAllowed=y&sequence=2](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/79567/CONICET_Digital_Nro.e6d0cc64-c4b8-4928-b4ea-97dd45b3114b_A.pdf?isAllowed=y&sequence=2)
- [13] M. Marchetto, E.P. Gianotti, J.R. Campos, R.C. Pires, E.D. Moraes. (2003). Estimate of denitrifying microbiota in tertiary sewage treatment and kinetics of the denitrification process using different sources of carbon. *Braz J Microbiol*, 34, 104-110.  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-83822003000200003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-83822003000200003)
- [14] F.M. Zoppas, A. Meneguzzi, H. Urrutia, A.M. Bernardes, C. Antileo (2017). Comparison of different strategies for nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification process in a batch rotating disk reactor, *American Journal of Engineering Research*, 6. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/44561>
- [15] R.A. Rozendal, H.V.M. Hamelers, K. Rabaey, J. Keller, C.J.N. Buisman (2008). Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends Biotechnol*, 26, 450-459.  
[file:///C:/Users/alfon/Downloads/2008\\_Trends20in20Biotechnology\\_Towards20practical20implementation20of20bioelectrochemical\\_Rozendal.pdf](file:///C:/Users/alfon/Downloads/2008_Trends20in20Biotechnology_Towards20practical20implementation20of20bioelectrochemical_Rozendal.pdf)

- [16] MBR- BIORREACTOR DE MEMBRANA. *BIOAZUL.com*  
<https://www.bioazul.com/mbr-biorreactor-de-membrana/>
- [17] I.A.S. Ortiz (2009). Remoción de nitrógeno de agua residual de producción intensiva de tilapias con recirculación utilizando reactor de lecho fluidizado con circulación en tubos concéntricos. *Facultad de Ingeniería de Isla Soltera, UNESP*.  
[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/98076/sanchezortiz\\_ia\\_me\\_ilha.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/98076/sanchezortiz_ia_me_ilha.pdf?sequence=1)
- [18] T.H. Martins (2007). Enriquecimiento de Consorcios Microbianos en Quimiostatos bajo Condiciones Anammox. *Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos*.  
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-02072007-230623/publico/MARTINSTH.pdf>
- [19] T.F. Beltrame, V. Coelho, L. Marder, J.Z. Ferreira, F.A. Marchesini, A.M. Bernardes (2017). Effect of operational parameters and Pd/In catalyst in the reduction of nitrate using copper electrode. *Environ Technol*, 1-13.  
<file:///C:/Users/alfon/Downloads/EffectofoperationalparametersandPdIncatalystinthereductionofnitrateusingcopperelectrode.pdf>
- [20] C. Franch Martí (2011). Eliminación catalítica de nitratos en continuo en aguas naturales. *Departamento de Química, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia*.  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14118/tesisUPV3663.pdf?sequence=1>
- [21] L. Szpyrkowicz, S. Daniele, M. Radaelli, S. Specchia (2006). Removal of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> from water by electrochemical reduction in different reactor configurations. *Applied Catalysis B: Environmental*, 66, 40-50.  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0926337306000762?token=DA9AC7907711C468355591AC2D840611EBE10AF92F3DA35E74ADAFB4F818744933495DC2C2422BE73B9900069C40E7A2&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210411152819>
- [22] S. Tyagi, D. Rawtani, N. Khatri, M. Tharmavaram (2018). Strategies for Nitrate removal from aqueous environment using Nanotechnology: A Review, *Journal of Water Process Engineering*, 21, 84-95.  
<https://daneshyari.com/article/preview/6672027.pdf>

- [23] M.A. Menkouchi Sahli, S. Annouar, M. Mountadar, A. Soufiane, A. Elmidaoui (2008). Nitrate removal of brackish underground water by chemical adsorption and by electro dialysis. *Desalination*, 227, 327- 333.  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0011916408002130?token=827A11F69DF2393ED597D73EF7DA5E8503866071D91565D4BDF404D2A515D6F91129EC8ABB7B0285B58C1F972DD745F2&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210411160558>
- [24] A. Giwa, V. Dufour, F. Al Marzooqi, M. Al Kaabi, S.W. Hasan (2017). Brine management methods: Recent innovations and current status. *Desalination*, 407, 1-23.  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0011916416305306?token=1D7C56A3BBBD48BEC579FAFC6D70A48F3A5C858615341579747B979CCB5630A17C79B834C473F80DAB83281BB2078A873&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210411173753>
- [25] L. B. Elsa Maria; M. V. Gabriela; P. C. Mario Antonio (2021). Escasez de y contaminación del agua, realidades del siglo XXI. *Universidad de Ciencias Médicas de Granma. Facultad de Ciencias Médicas de Bayamo "Dr Efraín Benítez Popa"*.  
<file:///C:/Users/alfon/Downloads/854-4487-2-PB.pdf>
- [26] Díaz García, Carolina (2021). Denitrification of saline agricultural effluents (brine from groundwater desalination plants and agricultural leachates) in woodchip bioreactors in the SE of Spain. *Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena*. <https://oatd.org/oatd/record?record=handle%3A10317%2F9260>
- [27] Cyclucid; [www.DepuracionIndustrial.com](http://www.DepuracionIndustrial.com). *Purines de Cerdo y Vacuno*.  
<https://www.cyclucid.com/referencias/agroalimentaria/purines-de-cerdo-y-vacuno/>
- [28] Robert L. Irvine (1988). Sequencing batch reactors for biological wastewater treatment. *Article in Critical Reviews in Environmental Control*.  
<file:///C:/Users/alfon/Downloads/CRCSEBRPaper1989.pdf>
- [29] Remtavares (2006). Reactores biológicos secuenciales (SBR): una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales industriales.  
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336>
- [30] M<sup>a</sup> Isabel Escaler y Rafel Mujeriego (2001). Eliminación biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activos. *Ingeniería del Agua. Vol 8. N<sup>o</sup> 1*. <https://iwaponline.com/IA/article/8/1/67/68285/Eliminacion-biologica-de-nutrientes-nitrogeno-y>
- [31] M. Sc. Alma Deloya Martínez. BIODISCOS: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de



terreno. *Dialnet*; ISSN 0379-3962, Vol. 13, Nº4.

<file:///C:/Users/alfon/Downloads/Dialnet-Biodiscos-4835478.pdf>

- [32] Bosch-Jiménez, Pau; Molognoni, Daniele; Corbella, Clara; Borràs Eduard (2020). AEI 516 – Sistemas bioelectroquímicos para aumentar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas. *Artículo de Automática e Instrumentación*, Nº516, págs. 29-31. <https://www.automaticaeinstrumentacion.com/texto-diario/mostrar/2734888/aei-516-sistemas-bioelectroquimicos-aumentar-sostenibilidad-procesos-tratamiento-aguas#:~:text=Las%20tecnolog%C3%ADas%20BES%20integran%20electrodos,contenidos%20en%20el%20agua%20residual.>
- [33] Biorreactor de membranas MBR: Descripción y su aplicación al tratamiento de aguas residuales. *Artículo técnico de Bluegold* (2020). <https://www.bluegold.es/biorreactores-de-membrana-mbr-descripcion-y-aplicacion/>
- [34] Daniel Aguado García (2019). Reactores biológicos de Membranas – MBR. *UPV*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/115673>
- [35] Crombet Grillet, Sandra; Abalos Rodríguez, Arelis; Rodríguez Pérez, Suyén; Pérez Pompa, Norma (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57715. <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v18n1/v18n1a05.pdf>
- [36] Rodríguez V, Alexandra Jenny. Tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería sanitaria, profesora asociada de la Universidad el Valle, Cali – Colombia*. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- [37] Patricia Torres (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 18, p. 115-129. Diciembre 2012 *Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)*. <file:///C:/Users/alfon/Downloads/Dialnet-PerspectivasDelTratamientoAnaerobioDeAguasResidual-5688315.pdf>
- [38] Tratamiento de aguas residuales por métodos electroquímicos. *LEQA – Grupo de Electroquímica Aplicada y Electrocatálisis*. <https://web.ua.es/es/leqa/tratamiento-de-aguas-residuales-por-metodos-electroquimicos.html>

- [39] Ulises Miguel López García (2005). Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua. *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica*.  
<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua..pdf>
- [40] Ósmosis inversa. Condorchem envitech, smart ideas for wastewater & air treatment. <https://condorchem.com/es/osmosis-inversa/>
- [41] John C. Crittenden; R. Rhodes Trussell; David W. Hand; Kerry Howe; George Tchobanoglous (2012). MWH's Water Treatment: Principles and Design. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SIHAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=MWH%E2%80%99s+water+treatment:+principles+and+design.+John+C.+Crittenden+et+al.&ots=p-gIRAzZgp&sig=5ROxJTVE69vqgGjaTUEVYIDCZaA#v=onepage&q&f=false>
- [42] Ósmosis inversa. GEDAR – Gestión de Aguas y Residuos / Tratamiento de Aguas. <https://www.gedar.com/industriales/osmosis-inversas.htm>
- [43] Intercambio Iónico; Carbotecnia. *Centro de Aprendizaje*.  
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/suavizadores-y-desmineralizadores/que-es-el-intercambio-ionico-y-tipos-de-resinas/>
- [44] Tratamiento de agua por Intercambio Iónico (2020). *Arveng training & engineering*. <https://arvengtraining.com/tratamiento-de-agua-por-intercambio-ionico/>
- [45] Franch Martí, Cristina (2011). Eliminación catalítica de nitratos en continuo en aguas naturales. *Departamento de Química del Instituto Universitario Mixto de Tecnología Química (UPV-CSIC)*.  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14118/tesisUPV3663.pdf?sequence=1>
- [46] J.W. Peel; K.J. Reddy; B.P. Sullivan; J.M. Bowen (2002). Electrocatalytic reduction of nitrate in water. *Water Research* 37; pp: 12-2519.  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0043135403000083?token=93C5F4E86D2D21B09D758C3366F71475894A65CE51D745BFF6B403C067F8A7B1B7FAE6DAA62BA288D7E53C4099516385&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210428074315>

- [47] Toshiyuki Mori; Jun Suzuki; Kenjiro Fujimoto; Mamoru Watanabe; Yoshio Hasegawa (1999). Reductive decomposition of nitrate ion to nitrogen in water on a unique hollandite photocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental* 23; pp: 283-289. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0926337399000867?token=9EF590C87AD439C3253A38CEFB51D60106092A7CE8A01A8F4E63475C04BF32BE1466DBD3EDAC74905E1850B03693807&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210428081806>
- [48] Jose G. Carriazo; Martha J. Saavedra; Manuel F. Molina (2010). Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *Publicado en línea el 3 de mayo de 2010, ISSSNE* 1870-8404. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0187893X18300879?token=E49F7CF3EE9F10978BE2089CAC34D45D2848E1ECF6BB6DE8737DAE0A9A8F94EBFA657B97989F08F2328CF03D5FB143D3&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210428085823>
- [49] Opciones de Tratamientos de Aguas residuales mediante carbón activo. *GEDAR Gestión de Aguas y Residuos*. <https://www.gedar.com/PDF/Industrial/GEDAR-Carbon Activo Aguas Residuales.pdf>
- [50] Ácido Clorhídrico (HCl). Protección civil y riesgos de productos químicos. [http://www.proteccioncivil.es/riesgos/quimicos/fichas-toxicologicas/corrosivo/-/asset\\_publisher/O3eU8FspXzkM/content/acido-clorhidrico-hcl/pop\\_up?](http://www.proteccioncivil.es/riesgos/quimicos/fichas-toxicologicas/corrosivo/-/asset_publisher/O3eU8FspXzkM/content/acido-clorhidrico-hcl/pop_up?)

## 9. ANEXO

Tabla 9.1 Resultados obtenidos en el laboratorio

DISUOLUCION MADRE (PPM)	PPM	MEDIO FILTRANTE	MML	MEDIDA	PPM (NITRATOMETRO)/L	PPM (NITRATOMETRO)/ML	PPM REDUCIDAS	MEDIA (PPM)	PORCENTAJES (%)
680	100	1	147,0588235	1	350	51,47058824	48,52941176	43,62745098	43,62745098
				2	380	55,88235294	44,11764706		
				3	370	54,41176471	45,58823529		
				4	400	58,82352941	41,17647059		
				5	440	64,70588235	35,29411765		
680	101	1	148,5294118	1	520	77,23529412	23,76470588	10,39705882	10,29411765
				2	590	87,63235294	13,36764706		
				3	610	90,60294118	10,39705882		
				4	640	95,05882353	5,941176471		
				5	630	93,57352941	7,426470588		
LAVADO (100mL de HCl)									
670	101	2	150,7462687	1	400	60,29850746	40,70149254	40,70149254	40,29850746
				2	400	60,29850746	40,70149254		
				3	410	61,80597015	39,19402985		
				4	400	60,29850746	40,70149254		
				5	400	60,29850746	40,70149254		
670	102	2	152,238806	1	480	73,07462687	28,92537313	22,32835821	21,89054726
				2	510	77,64179104	24,35820896		
				3	520	79,1641791	22,8358209		
				4	540	82,20895522	19,79104478		
				5	560	85,25373134	16,74626866		
670	103	2	153,7313433	1	480	73,79104478	29,20895522	24,08457711	23,38308458
				2	510	78,40298507	24,59701493		
				3	520	79,94029851	23,05970149		
				4	510	78,40298507	24,59701493		
				5	520	79,94029851	23,05970149		
670	104	2	155,2238806	1	490	76,05970149	27,94029851	27,42288557	26,3681592
				2	490	76,05970149	27,94029851		
				3	480	74,50746269	29,49253731		
				4	500	77,6119403	26,3880597		
				5	520	80,71641791	23,28358209		
670	105	2	156,7164179	1	450	70,52238806	34,47761194	29,7761194	28,35820896
				2	480	75,2238806	29,7761194		
				3	480	75,2238806	29,7761194		
				4	480	75,2238806	29,7761194		
				5	490	76,79104478	28,20895522		
670	106	2	158,2089552	1	420	66,44776119	39,5523881	33,75124378	31,84079602
				2	450	71,19402985	34,80597015		
				3	460	72,7761194	33,2238806		
				4	460	72,7761194	33,2238806		
				5	470	74,35820896	31,64179104		
LAVADO (100mL de HCl)									
640	107	2	167,1875	1	460	76,90625	30,09375	28,97916667	27,08333333
				2	470	78,578125	28,421875		
				3	460	76,90625	30,09375		
				4	470	78,578125	28,421875		
				5	470	78,578125	28,421875		
LAVADO (100mL de HCl)									
800	108	2	135	1	390	52,65	55,35	51,3	47,5
				2	410	55,35	52,65		
				3	430	58,05	49,95		
				4	420	56,7	51,3		
				5	430	58,05	49,95		
800	109	2	136,25	1	590	80,3875	28,6125	27,25	25
				2	590	80,3875	28,6125		
				3	590	80,3875	28,6125		
				4	620	84,475	24,525		
				5	620	84,475	24,525		
800	110	2	137,5	1	580	79,75	30,25	24,29166667	22,08333333
				2	620	85,25	24,75		
				3	610	83,875	26,125		
				4	640	88	22		
				5	650	89,375	20,625		
LAVADO (100mL de HCl)									
800	111	2	138,75	1	350	48,5625	62,4375	56,425	50,83333333
				2	380	52,725	58,275		
				3	400	55,5	55,5		
				4	400	55,5	55,5		
				5	400	55,5	55,5		
800	112	2	140	1	560	78,4	33,6	31,26666667	27,91666667
				2	570	79,8	32,2		
				3	580	81,2	30,8		
				4	590	82,6	29,4		
				5	580	81,2	30,8		

800	113	2	141,25	1	640	90,4	22,6	19,775	17,5
				2	650	91,8125	21,1875		
				3	660	93,225	19,775		
				4	670	94,6375	18,3625		
				5	670	94,6375	18,3625		
LAVADO (100mL de HCl)									
740	114	2	154,0540541	1	420	64,7027027	49,2972973	46,72972973	40,99099099
				2	430	66,24324324	47,75675676		
				3	440	67,78378378	46,21621622		
				4	440	67,78378378	46,21621622		
				5	450	69,32432432	44,67567568		
LAVADO (100mL de HCl)									
740	115	2	155,4054054	1	440	68,37837838	46,62162162	39,88738739	34,68468468
				2	480	74,59459459	40,40540541		
				3	480	74,59459459	40,40540541		
				4	490	76,14864865	38,85135135		
				5	500	77,7027027	37,2972973		
LAVADO (100mL de HCl)									
740	116	2	156,7567568	1	450	70,54054054	45,45945946	39,71171171	34,23423423
				2	480	75,24324324	40,75675676		
				3	480	75,24324324	40,75675676		
				4	500	78,37837838	37,62162162		
				5	510	79,94594595	36,05405405		
LAVADO (100mL de HCl)									
895	117	2	130,726257	1	430	56,2122905	60,7877095	51,63687151	44,13407821
				2	480	62,74860335	54,25139665		
				3	500	65,36312849	51,63687151		
				4	520	67,97765363	49,02234637		
				5	530	69,2849162	47,7150838		
895	118	2	131,8435754	1	620	81,74301676	36,25698324	24,39106145	20,67039106
				2	700	92,29050279	25,70949721		
				3	700	92,29050279	25,70949721		
				4	730	96,24581006	21,75418994		
				5	740	97,56424581	20,43575419		
LAVADO (100mL de HCl)									
895	119	2	132,9608939	1	420	55,84357542	63,15642458	50,74674115	42,6443203
				2	490	65,15083799	53,84916201		
				3	510	67,81005587	51,18994413		
				4	540	71,79888268	47,20111732		
				5	540	71,79888268	47,20111732		
895	120	2	134,0782123	1	700	93,8547486	26,1452514	22,5698324	18,80819367
				2	730	97,87709497	22,12290503		
				3	720	96,53631285	23,46368715		
				4	730	97,87709497	22,12290503		
				5	750	100,5586592	19,44134078		
LAVADO (100mL de HCl)									
680	121	2	177,9411765	1	430	76,51470588	44,48529412	32,62254902	26,96078431
				2	490	87,19117647	33,80882353		
				3	490	87,19117647	33,80882353		
				4	510	90,75	30,25		
				5	520	92,52941176	28,47058824		
LAVADO (100mL de HCl)									
700	122	2	174,2857143	1	460	80,17142857	41,82857143	30,79047619	25,23809524
				2	520	90,62857143	31,37142857		
				3	530	92,37142857	29,62857143		
				4	520	90,62857143	31,37142857		
				5	550	95,85714286	26,14285714		
LAVADO (100mL de HCl)									
700	123	2	175,7142857	1	430	75,55714286	47,44285714	34,55714286	28,0952381
				2	480	84,34285714	38,65714286		
				3	510	89,61428571	33,38571429		
				4	520	91,37142857	31,62857143		
				5	520	91,37142857	31,62857143		
LAVADO (100mL de HCl)									
700	124	2	177,1428571	1	460	81,48571429	42,51428571	34,24761905	27,61904762
				2	480	85,02857143	38,97142857		
				3	510	90,34285714	33,65714286		
				4	530	93,88571429	30,11428571		
				5	540	95,65714286	28,34285714		
LAVADO (100mL de HCl)									

700	125	2	178,5714286	1	480	85,71428571	39,28571429	28,57142857	22,85714286
				2	540	96,42857143	28,57142857		
				3	540	96,42857143	28,57142857		
				4	540	96,42857143	28,57142857		
				5	550	98,21428571	26,78571429		
LAVADO (100mL de HCl)									
700	126	2	180	1	420	75,6	50,4	32,4	25,71428571
				2	500	90	36		
				3	530	95,4	30,6		
				4	530	95,4	30,6		
				5	540	97,2	28,8		
LAVADO (100mL de HCl)									
870	127	2	145,9770115	1	510	74,44827586	52,55172414	43,30651341	34,09961686
				2	560	81,74712644	45,25287356		
				3	580	84,66666667	42,33333333		
				4	580	84,66666667	42,33333333		
				5	580	84,66666667	42,33333333		
LAVADO (100mL de HCl)									
870	128	2	147,1264368	1	480	70,62068966	57,37931034	46,09961686	36,01532567
				2	540	79,44827586	48,55172414		
				3	560	82,3908046	45,6091954		
				4	580	85,33333333	42,66666667		
				5	570	83,86206897	44,13793103		
LAVADO (100mL de HCl)									
780	129	2	165,3846154	1	510	84,34615385	44,65384615	31,97435897	24,78632479
				2	580	95,92307692	33,07692308		
				3	580	95,92307692	33,07692308		
				4	600	99,23076923	29,76923077		
				5	610	100,8846154	28,11538462		
LAVADO (100mL de HCl)									
780	130	2	166,6666667	1	550	91,66666667	38,33333333	27,77777778	21,36752137
				2	600	100	30		
				3	610	101,66666667	28,33333333		
				4	630	105	25		
				5	630	105	25		
LAVADO (100mL de HCl)									
860	131	2	152,3255814	1	510	77,68604651	53,31395349	47,72868217	36,43410853
				2	530	80,73255814	50,26744186		
				3	550	83,77906977	47,22093023		
				4	560	85,30232558	45,69767442		
				5	560	85,30232558	45,69767442		
LAVADO (100mL de HCl)									
860	132	2	153,4883721	1	450	69,06976744	62,93023256	54,23255814	41,08527132
				2	500	76,74418605	55,25581395		
				3	510	78,27906977	53,72093023		
				4	520	79,81395349	52,18604651		
				5	510	78,27906977	53,72093023		
LAVADO (100mL de HCl)									
860	133	2	154,6511628	1	400	61,86046512	71,13953488	63,92248062	48,0620155
				2	440	68,04651163	64,95348837		
				3	450	69,59302326	63,40697674		
				4	450	69,59302326	63,40697674		
				5	460	71,13953488	61,86046512		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
860	134	2	155,8139535	1	540	84,13953488	49,86046512	44,14728682	32,94573643
				2	560	87,25581395	46,74418605		
				3	580	90,37209302	43,62790698		
				4	590	91,93023256	42,06976744		
				5	610	95,04651163	38,95348837		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
860	135	2	156,9767442	1	550	86,3372093	48,6627907	39,76744186	29,45736434
				2	600	94,18604651	40,81395349		
				3	610	95,75581395	39,24418605		
				4	610	95,75581395	39,24418605		
				5	620	97,3255814	37,6744186		
LAVADO (100mL de HCl)									
840	136	2	161,9047619	1	510	82,57142857	53,42857143	50,73015873	37,3015873
				2	520	84,19047619	51,80952381		
				3	540	87,42857143	48,57142857		
				4	530	85,80952381	50,19047619		
				5	530	85,80952381	50,19047619		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
720	137	2	190,2777778	1	510	97,04166667	39,95833333	24,73611111	18,05555556
				2	580	110,3611111	26,63888889		
				3	590	112,2638889	24,73611111		
				4	600	114,1666667	22,83333333		
				5	600	114,1666667	22,83333333		
LAVADO (100mL de HCl)									

720	138	2	191,6666667	1	450	86,25	51,75	36,41666667	26,38888889
				2	520	99,66666667	38,33333333		
				3	530	101,58333333	36,41666667		
				4	540	103,5	34,5		
				5	540	103,5	34,5		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
930	139	2	149,4623656	1	710	106,1182796	32,88172043	28,89605735	20,78853047
				2	740	110,6021505	28,39784946		
				3	740	110,6021505	28,39784946		
				4	740	110,6021505	28,39784946		
				5	730	109,1075269	29,89247312		
LAVADO (100mL de HCl)									
930	140	2	150,5376344	1	500	75,2688172	64,7311828	58,70967742	41,93548387
				2	530	79,78494624	60,21505376		
				3	540	81,29032258	58,70967742		
				4	550	82,79569892	57,20430108		
				5	730	109,8924731	30,10752688		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
930	141	2	151,6129032	1	630	95,51612903	45,48387097	38,91397849	27,59856631
				2	670	101,5806452	39,41935484		
				3	670	101,5806452	39,41935484		
				4	680	103,0967742	37,90322581		
				5	680	103,0967742	37,90322581		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
930	142	2	152,688172	1	660	100,7741935	41,22580645	34,10035842	24,01433692
				2	690	105,3548387	36,64516129		
				3	720	109,9354839	32,06451613		
				4	720	109,9354839	32,06451613		
				5	710	108,4086022	33,59139785		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
930	143	2	153,7634409	1	620	95,33333333	47,66666667	41,00358423	28,67383513
				2	660	101,483871	41,51612903		
				3	670	103,0215054	39,97849462		
				4	690	106,0967742	36,90322581		
				5	660	101,483871	41,51612903		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
930	144	2	154,8387097	1	640	99,09677419	44,90322581	35,09677419	24,37275986
				2	710	109,9354839	34,06451613		
				3	710	109,9354839	34,06451613		
				4	710	109,9354839	34,06451613		
				5	690	106,8387097	37,16129032		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1000	145	2	145	1	650	94,25	50,75	42,05	29
				2	690	100,05	44,95		
				3	720	104,4	40,6		
				4	740	107,3	37,7		
				5	720	104,4	40,6		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1000	146	2	146	1	710	103,66	42,34	37,47333333	25,66666667
				2	740	108,04	37,96		
				3	750	109,5	36,5		
				4	740	108,04	37,96		
				5	750	109,5	36,5		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1000	147	2	147	1	710	104,37	42,63	41,65	28,33333333
				2	750	110,25	36,75		
				3	710	104,37	42,63		
				4	730	107,31	39,69		
				5	680	99,96	47,04		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1000	148	2	148	1	630	93,24	54,76	42,92	29
				2	700	103,6	44,4		
				3	710	105,08	42,92		
				4	720	106,56	41,44		
				5	730	108,04	39,96		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1000	149	2	149	1	620	92,38	56,62	41,22333333	27,66666667
				2	710	105,79	43,21		
				3	740	110,26	38,74		
				4	740	110,26	38,74		
				5	720	107,28	41,72		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1000	150	2	150	1	640	96	54	38,5	25,66666667
				2	720	108	42		
				3	750	112,5	37,5		
				4	760	114	36		
				5	770	115,5	34,5		

MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
640	25	1	39,0625	1	130	5,078125	19,921875	20,703125	82,8125
				2	110	4,296875	20,703125		
				3	110	4,296875	20,703125		
				4	110	4,296875	20,703125		
				5	110	4,296875	20,703125		
640	30	1	46,875	1	210	9,84375	20,15625	20,3125	67,70833
				2	210	9,84375	20,15625		
				3	210	9,84375	20,15625		
				4	200	9,375	20,625		
				5	200	9,375	20,625		
640	35	1	54,6875	1	270	14,765625	20,234375	20,59895833	58,85417
				2	280	15,3125	19,6875		
				3	250	13,671875	21,328125		
				4	260	14,21875	20,78125		
				5	260	14,21875	20,78125		
640	40	1	62,5	1	370	23,125	16,875	15,83333333	39,58333
				2	380	23,75	16,25		
				3	400	25	15		
				4	390	24,375	15,625		
				5	390	24,375	15,625		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
640	45	1	70,3125	1	220	15,46875	29,53125	28,125	62,5
				2	240	16,875	28,125		
				3	240	16,875	28,125		
				4	240	16,875	28,125		
				5	250	17,578125	27,421875		
640	50	1	78,125	1	460	35,9375	14,0625	8,333333333	16,66667
				2	510	39,84375	10,15625		
				3	530	41,40625	8,59375		
				4	560	43,75	6,25		
				5	560	43,75	6,25		
2º LAVADO (100ml de HCl)									
640	55	1	85,9375	1	98	8,421875	46,578125	46,40625	84,37500
				2	100	8,59375	46,40625		
				3	100	8,59375	46,40625		
				4	100	8,59375	46,40625		
				5	100	8,59375	46,40625		
640	60	1	93,75	1	170	15,9375	44,0625	42,5	70,83333
				2	180	16,875	43,125		
				3	190	17,8125	42,1875		
				4	190	17,8125	42,1875		
				5	190	17,8125	42,1875		
640	65	1	101,5625	1	290	29,453125	35,546875	33,85416667	52,08333
				2	310	31,484375	33,515625		
				3	310	31,484375	33,515625		
				4	300	30,46875	34,53125		
				5	310	31,484375	33,515625		
640	70	1	109,375	1	410	44,84375	25,15625	18,59375	26,56250
				2	450	49,21875	20,78125		
				3	480	52,5	17,5		
				4	480	52,5	17,5		
				5	480	52,5	17,5		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
640	75	1	117,1875	1	440	51,5625	23,4375	22,265625	29,68750
				2	440	51,5625	23,4375		
				3	450	52,734375	22,265625		
				4	460	53,90625	21,09375		
				5	470	55,078125	19,921875		
3º LAVADO (100ml de HCl 2º vez que usamos Bot.4 para lavar)									
820	80	1	97,56097561	1	140	13,65853659	66,34146341	66,01626016	82,52033
				2	140	13,65853659	66,34146341		
				3	140	13,65853659	66,34146341		
				4	150	14,63414634	65,36585366		
				5	160	15,6097561	64,3902439		
820	81	1	98,7804878	1	340	33,58536585	47,41463415	44,7804878	55,28455
				2	360	35,56097561	45,43902439		
				3	370	36,54878049	44,45121951		
				4	370	36,54878049	44,45121951		
				5	370	36,54878049	44,45121951		
820	82	1	100	1	630	63	19	11	13,41463
				2	690	69	13		
				3	710	71	11		
				4	730	73	9		
				5	730	73	9		
4º LAVADO (100ml de HCl 3º vez que usamos Bot.4 para lavar)									



820	83	1	101,2195122	1	260	26,31707317	56,68292683	56,00813008	67,47967
				2	260	26,31707317	56,68292683		
				3	260	26,31707317	56,68292683		
				4	280	28,34146341	54,65853659		
				5	290	29,35365854	53,64634146		
820	84	1	102,4390244	1	590	60,43902439	23,56097561	12,97560976	15,44715
				2	680	69,65853659	14,34146341		
				3	700	71,70731707	12,29268293		
				4	700	71,70731707	12,29268293		
				5	730	74,7804878	9,219512195		
5ª LAVADO (100mL de HCl 2ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
820	85	1	103,6585366	1	140	14,51219512	70,48780488	68,7601626	80,89431
				2	150	15,54878049	69,45121951		
				3	160	16,58536585	68,41463415		
				4	160	16,58536585	68,41463415		
				5	160	16,58536585	68,41463415		
820	86	1	104,8780488	1	290	30,41463415	55,58536585	52,08943089	60,56911
				2	310	32,51219512	53,48780488		
				3	330	34,6097561	51,3902439		
				4	330	34,6097561	51,3902439		
				5	340	35,65853659	50,34146341		
820	87	1	106,097561	1	620	65,7804878	21,2195122	15,91463415	18,29268
				2	670	71,08536585	15,91463415		
				3	660	70,02439024	16,97560976		
				4	680	72,14634146	14,85365854		
				5	690	73,20731707	13,79268293		
6ª LAVADO (100mL de HCl 3ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
820	88	1	107,3170732	1	310	33,26829268	54,73170732	52,58536585	59,75610
				2	310	33,26829268	54,73170732		
				3	340	36,48780488	51,51219512		
				4	340	36,48780488	51,51219512		
				5	340	36,48780488	51,51219512		
7ª LAVADO (100mL de HCl 4ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
880	89	1	101,1363636	1	480	48,54545455	40,45454545	37,42045455	42,04545
				2	510	51,57954545	37,42045455		
				3	510	51,57954545	37,42045455		
				4	510	51,57954545	37,42045455		
				5	510	51,57954545	37,42045455		
25ª LAVADO (MF2) (100mL de HCl 5ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
880	90	2	102,2727273	1	630	64,43181818	25,56818182	22,15909091	24,62121
				2	650	66,47727273	23,52272727		
				3	650	66,47727273	23,52272727		
				4	690	70,56818182	19,43181818		
				5	730	74,65909091	15,34090909		
8ª LAVADO (100mL de HCl 6ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
880	91	2	103,4090909	1	410	42,39727272	48,60227273	47,22348485	51,89394
				2	420	43,43181818	47,56818182		
				3	430	44,46590909	46,53409091		
				4	420	43,43181818	47,56818182		
				5	430	44,46590909	46,53409091		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
880	92	1	104,5454545	1	630	65,86363636	26,13636364	18,81818182	20,45455
				2	670	70,04545455	21,95454545		
				3	710	74,22727273	17,72727272		
				4	720	75,27272727	16,72727273		
				5	720	75,27272727	16,72727273		
9ª LAVADO (100mL de HCl 7ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
880	93	1	105,6818182	1	470	49,67045455	43,32954545	40,15909091	43,18182
				2	490	51,78409091	41,21590909		
				3	500	52,84090909	40,15909091		
				4	510	53,89727272	39,10227273		
				5	530	56,01136364	36,98863636		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
880	94	1	106,8181818	1	490	52,34090909	41,65909091	23,14393939	24,62121
				2	640	68,36363636	25,63636364		
				3	650	69,43181818	24,56818182		
				4	700	74,72727272	19,22727273		
				5	740	79,04545455	14,95454545		
10ª LAVADO (100mL de HCl 8ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
880	95	1	107,9545455	1	450	48,57954545	46,42045455	41,74242424	43,93939
				2	460	49,65909091	45,34090909		
				3	500	53,97272727	41,02272727		
				4	520	56,13636364	38,86363636		
				5	540	58,29545455	36,70454545		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
880	96	1	109,0909091	1	640	69,81818182	26,18181818	17,09090909	17,80303
				2	670	73,09090909	22,90909091		
				3	750	81,81818182	14,18181818		
				4	770	84	12		
				5	750	81,81818182	14,18181818		
11ª LAVADO (100mL de HCl 9ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
880	97	1	110,2272727	1	520	57,31818182	39,68181818	33,8030303	34,84848
				2	560	61,72727273	35,27272727		
				3	560	61,72727273	35,27272727		
				4	600	66,13636364	30,86363636		
				5	630	69,44318182	27,55681818		
12ª LAVADO (100mL de HCl 10ª vez que usamos Bot.8 para lavar)									
1150	98	1	85,2173913	1	520	44,31304348	53,68695652	44,59710145	45,50725
				2	610	51,9826087	46,0173913		
				3	620	52,83478261	45,16521739		
				4	660	56,24347826	41,75652174		
				5	650	55,39130435	42,60869565		
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
MINI LAVADO ( 150 mL AGUA DESTILADA)									
1150	99	1	86,08695652	1	700	60,26086957	38,73913043	32,13913043	32,46377
				2	740	63,70434783	35,29565217		
				3	800	68,86956522	30,13043478		
				4	790	68,00869565	30,99130435		
				5	830	71,45217391	27,54782609		